

ВОЕННО-МОРСКАЯ АКАДЕМИЯ  
имени Адмирала Флота Советского Союза Н. Г. КУШНЕЦОВА

*Посвящается 300-летию Российского Флота*

Н. Г. ЗАХАРОВ, С. И. ПОСТОНЕН, В. И. РОМАНЬКОВ

# ТЕОРИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НАДВОДНЫХ КОРАБЛЕЙ

*Утверждена Главным управлением ВМФ  
в качестве учебника  
для слушателей Академии*

624183



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
1997

В учебнике рассмотрены многие комплексные (на базе системного подхода) проблемы, связанные с методологией, теорией и организацией проектирования подводных кораблей. Систематизированы основные сведения по теории обеспечения крейсерской проходимости с учетом свойств корабля. Приведены современные методы определения главных элементов этих кораблей с учетом архитектурно-конструктивных решений. Обобщены принципы построения математических моделей корабля. Приведены теории и методы обеспечения проектных решений при создании их.

Введение, гл. 1, гл. 2 (п. 4), гл. 4—8, гл. 10, 14, 15 (п. 1, 2, 3, 4), гл. 16 написаны доктором технических наук, профессором Н. Г. Захаровым; гл. 3, 9, 11, 12, 15 (п. 5) написаны кандидатом технических наук, доктором В. Н. Романовым; гл. 2 (п. 1, 2, 3), гл. 13 написаны кандидатом технических наук С. Н. Пестовым.

(Под общей редакцией Н. Г. ЗАХАРОВА)

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Последние десятилетия XX века характеризуется интенсивными изменениями практически во всех областях деятельности, так или иначе влияющих на состояние и развитие военных флотов. Прократилось глобальное противостояние двух политических систем, однако на смену этой военной опасности пришли локальные конфликты и региональные очаги напряженности. Новые политические условия и экономические затруднения привели к отказу от ориентации военных флотов ведущих морских держав на участие в глобальной ракетно-ядерной войне и их приоритетном развитии в интересах ведения локальных или обычных масштабных войн, как правило на ближней основе. При этом все отчетливее проявляется тенденция в переориентации ударных сил флота с морских целей на наземные. Все это в полной мере отразилось на состоянии и перспективах развития Военно-Морского Флота России.

Корректировка концептуальных установок строительства отечественного ВМФ потребовала существенной перестановки акцентов и в видении облика его корабельного состава. При этом определяющим в развитии современных кораблей становится их способность взаимодействовать с другими видами Вооруженных Сил страны и стран-союзников, массированно применять высокоточное оружие, использовать современные информационные средства и системы, обладать высокой скрытностью (прежде всего, по акустическому полю подводных лодок и в верхней полусфере надводных кораблей), защищенностью от средств воздушного нападения и боевой устойчивостью. На первый план выдвигаются также вопросы эксплуатационной пригодности и живучести.

Современный боевой корабль с одной стороны представляет собой многофункциональную боевую систему, с другой — слож-

ное инженерное сооружение. Его создание требует длительного времени, привлечения большого числа научных и конструкторских организаций, промышленных предприятий различных отраслей. При этом одним из основных вопросов становится проблема выбора оптимального направления в строительстве корабельного состава флота и обеспечении эффективного использования выделяемых для этого средств. Решение этих задач неразрывно связано с обеспечением боевой эксплуатации находящихся в составе сил флота кораблей, боевой подготовки личного состава, а также развитием оперативного искусства и тактики использования сил и средств в вооруженной борьбе на море. По мере совершенствования тактико-технических характеристик кораблей будет расти и их влияние на характер и способы ведения боевых действий, а новые тактические приемы и способы станут в большей степени учитываться при выборе приоритетных направлений создания новой военно-морской техники (проявление этой тенденции встречается уже сегодня при анализе современных войн и конфликтов).

Среди перечисленных проблем одно из центральных мест занимает процесс формирования облика будущего корабля. Это большая научно-исследовательская и организационная работа, в которую вовлекается широкий круг специалистов Военно-Морского Флота и промышленности. В современных сложных военно-политических и производственно-экономических условиях эта работа не может быть успешной без достаточно развитой методологической и теоретической базы. Именно на создание такой базы найдена теория исследовательского проектирования кораблей. Эта теория выросла из общей теории проектирования кораблей и судов путем распространения ее на самые ранние стадии проектирования, соответствующие выделению полковых научно-исследовательских работ и формированию тактико-технического задания на проектирование корабля, а также на военно-политические, производственно-экономические и организационные проблемные вопросы, сопровождающие его создание.

Предметом теории исследовательского проектирования следует считать весь процесс оснащения Военно-Морского Флота

кораблями и судами всех классов в комплексе с их оружием, вооружением и военной техникой от начала формирования облика корабля на самых ранних этапах его разработки до момента утилизации. Нестыканными частями этого процесса является промышленное производство, так или иначе привлекаемое к созданию кораблей, и вся система заказа и финансирования продукции, изготавливаемой в интересах военного кораблестроения.

Традиционно основу теории проектирования составляли математические модели свойств проектируемого корабля и методы определения главных элементов проекта. В этом направлении теория развивалась до середины 70-х годов (12, 14, 36, 44, 47, 52, 171, 188, 196, 219, 254, 276, 288, 382, 412). В этот же период в связи с ростом номенклатуры оружия, вооружения и тактических средств, размещаемых на корабле, их усложнением (удорожанием) и более интенсивным взаимодействием обострилась потребность в получении более полной оценки корабля как сложной боевой системы в целом. Успехи, направленные на решение этой проблемы, привели к разработке нового раздела теории, получившего название военно-экономического анализа.

Становление этого раздела теории исследовательского проектирования произошло в то время, когда идеи и теоретические основы исследования операций как инструмента обоснования решений уже получили широкое распространение. Центральное место в теории исследования операций занимает понятие критерия оптимальности. В военно-экономическом анализе вводятся и рассматриваются критерии специального типа — "стоимость—эффективность". Суть использования этого типа критериев заключается в необходимости сопоставления боевой эффективности отдельного комплекса, корабля или эскадрильи кораблей, а возможно и ВМФ как вида Вооруженных Сил в целом в одном боевом эпизоде или в течение некоторого периода времени с теми затратами, которые нужно произвести для получения указанной боевой эффективности. При этом затраты могут быть представлены как в денежном, так и в ресурсном или временном выражении. Разумеется, нельзя считать, что идея сопоставления затрат и ожидаемого эффекта была впервые выдвинута в рамках

венно-экономического анализа. Она отражает общую концепцию целенаправленной (прагматической) деятельности человека. Поэтому существенную новинку в военно-экономическом анализе составили лишь сами методы определения количественных показателей боевой эффективности, ресурсных показателей и подходы к формированию на этой основе критерия оптимальности.

До конца 80-х годов в содержании критериев обоснования облика корабельного состава ВМФ в рамках военных исследований вкладывалась необходимость удовлетворения потребностей флота при решении возлагавшихся на него боевых задач. При этом учитывались также достигнутый научно-технический уровень и возможности производства. Вопросам экономического характера, как правило, отводилась второстепенная роль. Результатом применения такой системы критериев явилось стремление обосновать как можно более убедительное превосходство над вероятным противником. Причем, там, где этого превосходства не удавалось достигнуть за счет новых прогрессивных технических решений, задача решалась путем экстенсивного наращивания количественной составляющей.

Сегодня, в условиях фиксированных и жестко ограниченных ассигнований система критериальных оценок существенно изменилась. В ее основу положен принцип максимокритериальности, объединяющий в систему взаимосвязанных критериев на паритетной основе традиционный подход, опирающийся на перечень и требуемый уровень, решения стоящих перед ВМФ задач, а также обоснование, прогноз и анализ экономических показателей применительно к Военно-Морскому Флоту на макроэкономическом уровне, показателя эффективности использования средств перспективной промышленности; и, наконец, сравнительный анализ реальных показателей ряда зарубежных морских государств.

Коренные изменения, происходившие в нашей стране с 1991 г., затронули не только промышленные предприятия и организации оборонных отраслей промышленности, систему заказывающих органов Военно-Морского Флота, но потребовали также серьезного пересмотра отлаженной постановки теории ис-

следовательского проектирования, приложения новых усилий для приведения ее в соответствие с быстро меняющейся действительностью. Данная книга представляет собой изложение в систематизированном виде уже прошедших широкую апробацию разделов теории, а также по возможности полное освещение новых актуальных направлений ее развития. В целом учебник содержит методологические и теоретические аспекты, а также вопросы организации процесса создания перспективных кораблей ВМФ.

Учебник написан для слушателей Военно-морской академии и может быть использован курсантами и студентами других учебных заведений.

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящая книга является результатом методического объединения курса, читаемого авторами в течение ряда лет слушателям кафедры военного кораблестроения Военно-морской академии. Она является логическим продолжением ранее написанных и изданных в ВМА учебников и учебных пособий, наиболее замечательными из которых являются работы А. Э. Цукшвердта, А. И. Балкашина, Г. И. Попова, И. Г. Захарова. Кроме того, в книге использована значительная часть учебной литературы, изданной в Санкт-Петербургском Морском Техническом Университете, а также все известные монографические издания по вопросам проектирования (см. список литературы).

Предлагаемый учебник охватывает практически все вопросы проектирования современного корабля, появившиеся за последние 10—15 лет. Ко времени его написания вполне определялась и специфика этих вопросов применительно к профессиональной подготовке военных инженеров-кораблестроителей, что не удавалось сделать в предыдущих изданиях. Поэтому в учебнике, наряду с теоретическими вопросами, значительное место уделено проблемам методологии исследовательского проектирования, а также вопросам организации научных исследований в проектных работ в интересах создания перспективных кораблей ВМФ. При этом авторы стремились к тому, чтобы весь предлагаемый теоретический материал имел единую методологическую основу, а сведения, содержащиеся в учебнике, излагались таким образом, чтобы их можно было использовать в качестве руководства при организации проектных работ в промышленности.

Помимо традиционных методов проектирования в учебнике излагаются ставшие известными в последние годы подходы к

решению актуальных проектных задач, методы и алгоритмы их решения с помощью современной вычислительной техники.

Учебник состоит из шести разделов и 16 глав. Первый раздел посвящен наиболее общим вопросам методологии, теории и организации проектирования надводных кораблей. Наряду с приятиями системного подхода, как основы методологии современного проектирования, в нем содержится также изложение наиболее широко используемых в проектировании математических методов. Указываются этапы и последовательность выполнения проектных работ, описывается их организация в промышленности.

Второй раздел учебника посвящен принципам моделирования, вопросам анализа и нормирования свойств боевых кораблей. Раздел состоит из двух частей. Первая из них (гл. 4) содержит изложение принципов организации и управления процессом нормирования требований к свойствам надводных кораблей. Во второй части (гл. 5) излагаются методы системного моделирования этих свойств.

Центральное место в традиционных задачах проектирования занимают методы определения главных элементов корабля. Эти вопросы решаются в третьем разделе учебника. Он претерпел наибольшие изменения в связи с последними результатами, полученными в этом научном направлении.

Четвертый раздел посвящен изложению вопроса расчетно-графического плана, связанных с формой корпуса корабля и его общим расположением. Процесс автоматизации архитектурно-компоновочных решений при проектировании кораблей наладится на самом начальном этапе своего становления, однако и эта проблема нашла свое отражение в настоящем разделе.

Важное место в современном исследовательском проектировании занимает проблема оценки создаваемых кораблей. Сегодня эта оценка производится в рамках военно-экономического анализа. Методы и модели формирования экономических и эффективности оценок излагаются в пятом разделе учебника.

Последний, шестой, раздел учебника посвящен проблеме обоснования проектных решений при проектировании надводных кораблей. Каждый этап создания корабля требует принятия

целого комплекса различных решений, которые обосновываются всей мощью современной теории проектирования. Однако и сами механизмы выбора предпочтительного варианта обладают своей специальной теорией, методами и моделями, изложение которых содержится в этом разделе.

В процессе написания учебника авторы старались сопроводить методологические положения, теоретические послышки и модельные фрагменты, составляющие содержание настоящей книги, как можно большим количеством числовых примеров и контрольных цифр. Весь этот материал получен на основе обобщенных данных отечественной и иностранной литературы.

Большую помощь в создании учебника оказали авторам преподаватели кафедры военного кораблестроения ВМА и научные сотрудники ЦНИИ МО РФ.

Проектирование современного корабля является синтетической дисциплиной, которая помимо собственных теории и методов использует результаты, полученные в различных направлениях инженерного знания. Помещать все известные сегодня приложения в настоящий учебник авторам показалось нецелесообразным. Это привело бы к неоправданному увеличению объема книги и не позволило бы методически последовательно выстроить материал. Поэтому в учебнике обращение к моделям, полученным в других дисциплинах, осуществляется только как к примерам, иллюстрирующим основную линию изложения. Возможно, что это вызовет некоторые трудности при работе с книгой. Критические замечания и предложения, появляющиеся в процессе работы с учебником, авторы примут с вниманием и благодарностью.

#### КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Проектирование, являясь частью процесса создания кораблей для Военно-Морского Флота, тесно связано с военным кораблестроением. Первые упоминания о строительстве судов русскими мастерами на побережье Черного моря относятся к IV—VI вв. Известны также дальние походы русских в тяжелых условиях северных морей. По признанию известных в XVI в.

мореплавателей сильных морских держав, наши суда по мореходным качествам и наши мореплаватели по искусству управления судами достигли высокого уровня. На судах собственной постройки совершали свои походы дружинники Киевской Руси, доходя на них до Царьграда. О высоком качестве строившихся в России судов говорят великие географические открытия русских мореплавателей в XVI—XVIII вв. Это походы новгородских купцов на о. Шпицберген, Семеза Дежнева, в 1648 г. прошедшего проливом между Азией и Северной Америкой, и многие другие.

История русского военного кораблестроения связана с продолжительной борьбой за выход к Черному и Балтийскому морям. Первым в России военным кораблем стал построенный иностранцами специалистами совместно с русскими плотниками корабль "Фридрих". Это произошло в 1636 г. при царе Михаиле Федоровиче. Несколько позже, в 1667 г., под руководством боярина Афанасия Ордын-Нащекина на Оке в Коломенском уезде для защиты корабельных караванов началась постройка кораблей. В 1669 г. там были построены корабль "Орел", две шхеры и один бот.

Систематическая постройка военных кораблей развернулась только при Петре I.

В 1702 г. в ходе Северной войны России со Швецией за выход к Балтийскому морю (1670—1721) Петром I была взята шведская крепость Нотебург, и в 1703 г. на ней были заложены город Санкт-Петербург и крепость Кроншлот (о. Котлин). На верфях, создаваемых в устье Невы, началось строительство военных кораблей. Несколько раньше строительство военных кораблей началось в Архангельске в дельте р. Северная Двина на о. Соломбаль (1693) и в Воронеже на р. Дон (1694).

Дата выхода Указа Петра I о создании военного флота 20 октября 1696 г. считается началом создания регулярного Российского флота. Таким образом, необходимость строительства военного флота в России носила объективный характер и была связана с развитием промышленного производства, увеличением объема морских перевозок и необходимостью в связи с этим выход к морям и океанам для обеспечения торговли.

Проектирование кораблей до XVII в. развивалось относительно медленно. Ничто в это время не вытеснило изобразительной формы корпуса проектируемого корабля в виде теоретического чертежа. Он изображался в двух проекциях: корпус и полуширота. Батоксы появились только в конце XVIII в.

Развитие проектирования кораблей в конце XVIII и в первой половине XIX вв. было связано с ускорением темпа технического прогресса. В этот период на кораблях устанавливаются также последние достижения технической мысли, как механические двигатели. За период с 1815 по 1848 гг. в России были построены первые пароходы, в том числе и первый русский винтовой фрегат "Архимед" (1848). Осваивается строительство кораблей с металлическими корпусами, совершенствуется навигационное оборудование. Быстрыми темпами развивается корабельная артиллерия.

На основе интегрального и дифференциального исчисления, предложенных И. Ньютоном и Г. Лейбницем, родилась идея применения математического анализа в кораблестроительных науках. Автором одного из первых трудов, развивающих это направление, стал знаменитый математик, академик Петербургской Академии наук Л. Эйлер (1707—1783). Он предложил уравнение, связывающее ширину, осадку и коэффициенты полноты корабля с поперечной метacentрической высотой. Принцип составления этого уравнения не изменился до наших дней [405].

В труде Буге по теории корабля, написанном в 1746 г., отмечается, что еще в 1681 г. кораблестроители Франции высказались о целесообразности применения математики при проектировании кораблей. Французский кораблестроитель Дюамель де Монсо в своей книге "Начала корабельной архитектуры" в 1752 г. писал, что внедрение математических методов и использование прототипов при проектировании имеет исключительно важное значение для кораблестроения. Для определения длины корабля автор предлагал использовать схему размещения пучковых портов, а определение других главных размерений производить путем пересчета длины через их основные соотношения. Таким образом, размерения корабля определялись на основе обеспечения вместимости корпуса. Водонизмещение и осадка

рассчитывались после построения теоретического чертежа и разработки конструктивных чертежей корабля. Этот путь был впервые реализован английским кораблестроителем А. Диком. Благодаря ему осадку стали определять еще до спуска корабля на воду. Появилась возможность вырубку оружейных портов производить еще на стапеле.

К концу царствования Петра I военный флот России состоял из 48 линейных кораблей и фрегатов, 787 галер и других судов. В период русско-турецких войн середины и конца XVIII в. прошёл становление Черноморский флот. В 1783 г. была основана главная база этого флота - Севастополь.

Выход России к Черному и Балтийскому морям, нарастающие корабельного состава флота привели к необходимости дальнейшего развития военного кораблестроения. Для подготовки военных кадров по кораблестроению в 1796 г. было основано училище корабельной архитектуры, которое играет исключительную роль в подготовке военных кораблестроителей и сегодня.

В начале XIX в. появляются научные труды по военному кораблестроению, которые в основном посвящены корабельной архитектуре. В 1818 г. была издана работа П. Я. Гамалея "Высшая теория морского искусства", содержащая изложение теории корабля и теории и практики кораблестроения.

В 1828 г. вышли в свет учебные пособия по корабельной архитектуре В. Беркова "Начальные понятия и теоретические основы корабельной архитектуры" и А. В. Зенкова "Искусство делания мачт".

Определение главных размерений проектируемых кораблей в этот период стало производиться не только по габаритным соотношениям, но и с использованием уравнения водонизмещения (масс). Большой вклад в развитие кораблестроения, и в том числе проектирования корабля, внес адмирал шведского флота Фредерик-Георги Чалман (1721—1808). Для построения обводов ватерлиний и других корабельных кривых он предлагал использовать степенные параболы, которые и в настоящее время являются привычными.

В книге Ф. Чапмана "Опыт теоретического рассуждения об удобнейшем образовании и надлежащей величине линейных кораблей, и равно и фрегатов и других меньших военных кораблей" /385/ впервые была показана роль математических методов. Им было обобщено и предложено большое число эмпирических формул и правил, но имеющих достаточно глубокого физического смысла, но отражающих большой опыт постройки и эксплуатации судов. По этим формулам можно было определить массу корабля, его главные размерения и другие элементы корпуса и его конструкции. Такой подход в теории проектирования получил развитие в отечественном и зарубежном кораблестроении.

В 1836 г. опубликована работа русского корабельного инженера М. М. Окунова (1810—1873) "Опыт сочинения чертежей военных судов" — первый отечественный труд по проектированию, в котором предложены уравнения масс и приближенные формулы для расчета остойчивости по главным размерениям и коэффициентам полноты.

Французский самостоятельный инженер-кораблестроитель Жак-Огюстен Норман (1839—1906) исследовал многие вопросы кораблестроения, морского машиностроения и теории проектирования кораблей. В работе "Formules approximatives de construction navale" он уделил основное внимание разработке приближенных формул, позволяющих оценить влияние элементов корабля на исследуемые его свойства. В этой работе им предложены получившие всемирную известность приближенные формулы теоретического чертежа. Работы Л. Эйлера и М. М. Окунова, посвященные этой же теме, были ему неизвестны. Норману принадлежит идея дифференциального метода определения водоизмещения.

В 1885 г. на основе дифференциального метода Норман показал, что водоизмещение проектируемого корабля растет значительно быстрее массы, которая в силу изменения заданы на проектирование корабля добавляется к массам по отдельным разделам нагрузки корабля-прототипа. Отношение приращенных водоизмещения проекта корабля к приращению нагрузки масс.

исправленного в соответствии с заданием на проект прототипа, получило название коэффициента Нормана.

Примерно в это же время С. О. Буратов, строитель парохода "Нива" (1830) и преподаватель Морской академии, разрабатывает "Программу теории корабля", посвященную изложению сущности вопросов теории корабля как науки. Им же надается труд "Наука и искусство корабельного зодчего", в котором впервые определяется основная задача проектирования как задача нахождения наилучшей формы корабля при минимальной массе и максимальной прочности.

В 1852 г. издается монография Морского кадетского корпуса "Практика кораблестроения", разработанная корабельным инженером Мейсераком.

Поражение России в Крымской войне (1853—1856) лишило ее права на строительство и использование кораблей на Черном море до 1871 г. Крымская война показала, что эпоха парусного флота подошла к своему завершению. На смену парусным кораблям пришли паровые и винтовые корабли со стальным корпусом.

В этот период основное внимание в России уделяется развитию Балтийского флота. С 1863 г. начинается строительство броненосных кораблей, в развитии которых значительный вклад внес военно-морской деятель и кораблестроитель адмирал А. А. Попов (1821—1898). По проекту А. А. Попова в 1872 г. был построен крупнейший в мире броненосец "Петр Великий" водоизмещением около 10 000 т.

В 1878 г. после окончания двухлетней войны России с Турцией начинается возрождение Черноморского флота.

При ведении боевых действий против турецкого флота под руководством капитана 2 ранга С. О. Махарова впервые были успешно применены мины, что привело к появлению нового класса подводных кораблей: сначала — миноносков, а затем миноносцев (последствия — минных крейсеров, эскадренных миноносцев).

В этот же период развивается класс крейсеров, необходимых для выполнения разведки, несения дозора, самостоятельных действий на морских коммуникациях противника. В России в



1873—1883 гг. были построены броненосные крейсера водоизмещением 6000—7000 т "Минин", "Владимир Мономах" и др. Они имели толщину бронового пояса 175 мм, четыре 203-мм орудия в бортовых выступах и двенадцать 152-мм орудий на верхней палубе. Скорость их хода достигала 14 уз. В дальнейшем (1895—1899) были построены три более совершенных броненосных крейсера ("Рорик", "Россия", "Тромбой").

Таким образом, накануне XX в. русский флот усиленно пополнялся кораблями новых классов и типов благодаря интенсивному развитию кораблестроительной науки и судостроительной базы страны.

Трудами ученых создавалась молодая наука проектирования. Она становилась самостоятельной научной дисциплиной. В теории проектирования корабля учитывались недостатки построенных кораблей, опыт прошедших войн и плаваний. В 1898 г. впервые в Военно-морской академии профессором И. Г. Бубновым (1872—1919) был прочитан специальный курс проектирования кораблей. Им излагались идеи своего будущего дифференциального метода определения главных размерений корабля на основе уравнений масс и устойчивости.

Профессор К. П. Бокласский в 1904 г. издал первый в мире "Курс проектирования судов" /227/, в котором обобщал ранее накопленный материал и изложил свои исследования в этой области.

Начало XX века для России ознаменовалось русско-японской войной 1904—1905 гг. Эта война вскрыла серьезные недостатки в организации и строительстве флота, привела к пересмотру взглядов на дальнейшее развитие не только русского флота, но и мирового кораблестроения. Эпоха парового броненосного флота 80—90 годов XIX столетия ушла в прошлое. В ходе войны многие корабли погибли, корабли, не принимавшие участия в боевых действиях, а также те, что доставлялись на заводы, в значительной степени устарели и не отвечали требованиям ведения эффективной вооруженной борьбы на море. Таким образом, после 1905 г. флот надо было создавать заново.

В то же время, международная обстановка к концу первого десятилетия XX века становилась все более тревожной. Опасаясь мирового господства Германии, правительство Великобритании заключило с Францией соглашение о совместных действиях против Германии, получившее название "Антанта". В 1907 г. Россия вступила в союзе с Англией, в результате чего также примкнула к Антанта.

При подготовке к предстоящей войне враждующие группировки важную роль отводили боевым действиям на морских театрах вооруженной борьбы. В 1907 г. в России была принята программа восстановления флота на 1910—1920 гг., в дальнейшем в связи с нарастающим угрозой возникновения войны была создана программа усиленного судостроения на 1912—1916 гг. Для реализации кораблестроительных программ решающее значение имели производственно-экономические возможности страны. В начале века Россия получила крупную финансовую поддержку союзников, высоким темпами развивалась и национальная экономика. Накануне первой мировой войны среднегодовой прирост промышленной продукции в России составил 8,5%, при этом военная промышленность становилась одной из ведущих отраслей. Все это позволило увеличить расходы на флот, которые с 1907 по 1914 гг. возросли на 173,9% — это больше, чем в любой другой стране мира. В результате к 1914 г. в России насчитывалось более 20 крупных судостроительных и судоремонтных заводов, среди которых семь казенных, включенных в систему морского ведомства.

Таким образом, русская судостроительная промышленность позволила решить те сложные задачи, которые возникли при создании новых боевых кораблей. Отвечая требованиям практики новый импульс развития получила и теория проектирования.

В соответствии с принятой кораблестроительной программой предлагалось создание четырех линейных кораблей нового типа. Был объявлен международный конкурс на лучший проект. Рассмотрение представленных на конкурс проектов проведено под председательством А. И. Крылова (1865—1945) /288/. Излучшим из серии представленных на конкурс был принят проект Балтийского завода, разработанный под руко-

водством главного конструктора профессора И. Г. Бубнова. Для этого проекта (всего в серии складывалось четыре корабля, первый — "Петропавловск" вступил в строй в 1914 г.) И. Г. Бубнов разработал новую систему набора судового корпуса, получившую в дальнейшем широкое применение в мировой практике и именованную "русской". Вооружение линейных кораблей состояло из двенадцати 305-мм орудий и шестнадцати 120-мм противоминных орудий. Толщина броневой пояса по ватерлинии составляла 225 мм, казематов — 125 мм. Для Черного моря четыре аналогичных корабля типа "Императрица Мария" были заложены в 1912—1914 гг.

Интенсивное развитие в этот период получают миноносцы, эсминцы и крейсера. На смену миноносцам времен русско-турецкой войны пришли эскадренные миноносцы нового типа, первым представителем которых стал эсминец "Ноник". Его проект был создан под руководством А. Н. Крылова и И. Г. Бубнова. Существенные преимущества на этом корабле были достигнуты заменой угольного топлива котлов нефтяным. В 1911 г. эскадренный миноносец "Ноник" был спущен на воду, а в 1913 г. принят в состав Балтийского флота. Водоизмещение корабля составляло 1260 т, скорость полного хода 37,3 уз, обеспечивалась тремя паровыми турбинами общей мощностью 40 000 л. с. Такой большой скорости в то время не имел ни один корабль в мире. Его вооружение состояло из четырех 102-мм орудий, четырех двухтрубных, а затем трехтрубных торпедных аппаратов. На корабле обеспечивалось размещение 50 мин. Положенный в основу строительства последующих эсминцев первоначальный проект со временем претерпел ряд изменений. Всего было построено 37 эсминцев в пяти модификациях.

Достижения в области проектирования и строительства подводных кораблей того времени были обеспечены знаниями и трудом русских ученых кораблестроителей и конструкторов во главе с А. Н. Крыловым, И. Г. Бубновым, К. П. Балашовым, А. И. Балашовым и др. В 1913 г. А. И. Балашовым издана курс "Проектирование судов", в котором излагает принадлежащее ему дальнейшее развитие метода И. Г. Бубнова. В 1916 г. И. Г. Бубнов в статье "Об одном методе определения главных

размерений судна" [46] опубликовал созданный им дифференциальный способ определения водоизмещения и главных размерений корабля.

Из зарубежных трудов того времени можно отметить появление в 1920 г. работы профессора Марселюстского технологического института (США) У. Ховгарда "Проектирование боевых кораблей", в которой были описаны разработанные им способы определения главных размерений и коэффициентов формы корпуса корабля.

После завершения первой мировой и последовавшей за ней гражданской войны перед страной встала проблема восстановления Военно-Морского Флота. К 1921 г. общий тоннаж советского флота равнялся 350 тыс. т, однако значительная часть кораблей по различным причинам не могла быть введена в строй. Возрождение флота, завершившееся к концу 1925 г., было осуществлено в основном за счет ремонта кораблей дореволюционной России. С момента постройки большинства этих кораблей прошло 8—10 лет. Боевые и технико-экономические характеристики восстановленных кораблей значительно уступали уровню мирового кораблестроения послевоенного периода. Усилить боевые возможности флота можно было только путем строительства новых кораблей, но для этого необходимы были соответствующие экономические предпосылки, развитая производственная база, кадры рабочих, конструкторов и ученых-кораблестроителей, научно-исследовательские учреждения. Решающим условием дальнейшего укрепления Военно-Морского Флота стала индустриализация страны, создание современной тяжелой промышленности и коренное техническое перевооружение на этой основе всей базы военного кораблестроения.

Эта работа была развернута в рамках сначала семилетней (1926—1932), а затем пятилетней (1929—1933) программы военного кораблестроения. На основании этих программ предполагалось более, чем в полтора раза увеличить производительность верфей, особенно в Ленинграде и Сормово. Однако экономические и производственные возможности страны все же оказались недостаточными для их реализации. Так, по строительству подводных лодок степень выполнения программы составила 23%, а

по строительству сторожевых кораблей — 39%. Удовлетворительно выполнялись планы удалось только применительно к небольшим и относительно несложным кораблям, строительство же крупных кораблей пришлось перенести в планы кораблестроения последующих лет.

В этих условиях на первый план выдвинулась задача формирования облика перспективных кораблей ВМФ. Для решения этой и многих других задач требовалось создание научного органа, который бы смог организовать работу по проектированию и строительству новых кораблей. Таким органом стал Научно-технический Комитет Морского ведомства (НТКМ), учрежденный приказом Реввоенсовета СССР № 2475 от 8.11.23 г. При Научно-техническом Комитете состоял опытовый судостроительный бассейн, сооруженный в 1925 г. в Петербурге по инициативе Д. И. Менделеева, научно-техническая лаборатория взрывчатых и дымообразующих веществ, научно-испытательный полигон связи и комиссия морских минных опытов. За девять лет своего существования НТКМ сыграл определяющую роль в разработке научно-технических проблем, связанных с созданием новых кораблей, усовершенствованием оружия, вооружения и технических средств.

В сентябре 1932 г. на базе НТКМ были созданы пять специализированных научно-исследовательских институтов: Научно-исследовательский артиллерийский институт, Научно-исследовательский институт связи, Научно-исследовательский химический институт, Научно-исследовательский минно-торпедный институт и Научно-исследовательский институт военного кораблестроения (ЦНИИВК) как головной научный орган флота в области военного кораблестроения.

Традиционные условия воля участников процесса восстановления отечественного флота дали осязаемые результаты только в начале тридцатых годов. В ноябре 1930 г. вступил в строй первый сторожевой корабль "Ураган". В 1932 г. был заложен и в 1936 г. вступил в строй первый лидер эскадренных миноносцев "Ленинград" (пр. 1). Создание этого корабля явилось вехой вехой в развитии подводного кораблестроения. Это был первый опыт проектирования и строительства довольно крупного по

тем временам корабля, вплотную подводившего кораблестроителей к созданию легких крейсеров. Корабль проектировался в Центральном конструкторском бюро судостроения (ЦКБС-1) под руководством главного конструктора В. А. Никитина. Наблюдение от ВМФ осуществлял А. Э. Цукишвердт. Водоизмещение лидера составляло 2260 т, скорость полного хода 41,2 уз. Вооружение — пять 130-мм артиллерийских орудий главного калибра, 2×76-мм и 5×45-мм установок зенитной артиллерии, два четырехтрубных торпедных аппарата, большое количество мин и другое вооружение.

В числе подводных кораблей наиболее универсальным по выполняемым задачам оказался класс эскадренных миноносцев. Поэтому ввиду за проектированием и развертыванием строительства сторожевых кораблей и лидеров типа "Ленинград" началась разработка проектов эскадренных миноносцев. Первым эсминцем новой постройки стал пр. 7. Главным конструктором проекта был В. А. Никитин, наблюдающим от ВМФ — А. Э. Цукишвердт. Головной корабль "Гневный" был заложен 27 ноября 1935 г. и вступил в строй в 1938 г. Эти корабли были лучшими в мире по скорости полного хода, достигшей 39 уз., и первоначальному для того времени оружию: артиллерийскому главному калибра — четыре 130-мм установки, зенитная артиллерия — 2×76 мм и 2×45 мм, торпедное вооружение — два трехтрубных торпедных аппарата.

22 сентября 1935 г. был заложен первый отечественный крейсер "Киров" (пр. 26), который по боевым возможностям того времени был одним из лучших легких крейсеров мира. Главным конструктором корабля был А. И. Маслов, главным наблюдателем от ВМФ — В. П. Благовещенский, проектировался корабль в ЦКБ-17. В 1938 г. "Киров" вошел в состав Балтийского флота.

Таким образом, к началу Великой Отечественной войны в стране был создан, по существу, заново военный флот. В своем составе он имел 7 крейсеров, 59 лидеров и эскадренных миноносцев, 218 подводных лодок, 369 торпедных катеров, 22 сторожевых корабля, 88 тральщиков, 77 отпавков за подводными лодками и другие корабли и катера (47)

В эти годы выросли кадры ученых, конструкторов и кораблестроителей. Были осуществлены теоретические и научно-технические разработки для проектирования крупных кораблей. Уже в 1935 г. в ЦНИИВК велась разработка по обоснованию обвода будущих линкоров (пр. 23) и тяжелых крейсеров (пр. 69).

Для обеспечения высоких темпов развития судостроения в этот период необходимо было ускорить разработку теории и методов проектирования кораблей. В 1923 г. выходит в свет труд В. Л. Позднина (1884—1948) "Практические данные для проектирования морских коммерческих судов", а в 1926—1927 гг. — "Основы проектирования морских коммерческих судов". В этих работах профессор В. Л. Позднин разработал методы экономического обоснования заданий, расчета себестоимости, способы оценки рентабельной и экономической скорости судна. В 1939 г. академик В. Л. Позднин создает первую часть курса "Теория проектирования судов", выпуск I — "Общие вопросы проектирования" /285/. В этом труде впервые в практике мирового кораблестроения были разработаны требования к вместимости военных кораблей и приближенный аналитический метод учета условий обвода при составлении и решении уравнения объема. В 1939 г. В. Л. Позднин издает вторую часть курса "Теория проектирования судов" /276/, посвятив ее методам определения водоизмещения и главных размерений корабля с учетом его вместимости.

Труды академика В. Л. Позднина явились основой общей теории проектирования судов. В этот период за рубежом издавались только отдельные разработки, посвященные приемам решения ряда частных задач проектирования.

Великая Отечественная война прервала успешно начавшееся осуществление плана строительства единого морского и океанского флота. По окончании войны руководителям страны была поставлена задача ускоренного развития ВМФ. Кораблестроительной программой первого послевоенного десятилетия предусматривалось создание новых кораблей и достройка кораблей, заложивших еще до войны. К числу таких кораблей относились легкие крейсера пр. 68К, эсминца пр. 30К, сторожевые корабли пр. 29К, базовые тральщики пр. 73К и др. С целью более полно-

го учета опыта минувшей войны отдельные проекты были переработаны. Переработанным проектам кораблей присваивался индекс "вис". Так были заново разработаны проекты легкого крейсера 68вис, эсминца 30вис, Головной крейсер пр. 68вис "Свердлов" был вооружен на Балтийском заводе в Ленинграде и вступил в состав ВМФ в 1952 г. Всего построено 14 таких кораблей. Серийное строительство эсминцев по проекту 30вис было развернуто в 1949 г. и велось одновременно на ряде заводов в Ленинграде, Северодвинске, Комсомольске-на-Амуре и Николаеве.

Среди новых кораблей, первоначально предусмотренных программой, к постройке, в частности, планировались /47/: линейный корабль пр.24, тяжелый крейсер пр.32, легкий крейсер пр. 65, эскадренный миноносец пр.41, сторожевой корабль пр.42 и др. Основывая в целом утвержденную в 1946 г. кораблестроительную программу, необходимо отметить, что она в значительной степени отражала взгляды на развитие флота довоенного периода. В техническом отношении прогресс в кораблестроении проявился в усовершенствовании вооружения и техники. Главным оружием надводных кораблей оставалась артиллерия, а в качестве главной энергетике сохранялись котлотурбинная и дизельная.

Между тем, опыт боевого применения флота и современные тенденции в развитии его боевых средств указывали на возрастающую роль авиации, наиболее уязвимым местом надводных кораблей становилась противолодочная оборона. В начале 30-х годов роль авиации как ударной силы значительно возросла с появлением ядерного оружия. В самой авиации к этому времени произошел качественный скачок в развитии ее боевых возможностей, вызванный заменой поршневых моторов на реактивные двигатели. К концу первого послевоенного десятилетия все явственнее вырисовывалась возможность использования ракет как главного оружия кораблей.

Все сказанное оказало влияние на пересмотр взглядов на роль и место крупных надводных кораблей в операции на океанском театре военных действий. Результатом этого явилось исключение из программы кораблестроения создания крупных

надводных кораблей. Для создания мощного океанского флота необходимы были принципиально новые корабли, системы вооружения и военно-морская техника. Это стало возможным лишь на последующих этапах развития кораблестроения.

Одним из первых кораблей нового проекта, построенных в первое послевоенное десятилетие, стал эскадренный миноносец пр.41 "Неустрашимый". И хотя строительство по этому проекту ограничилось одним кораблем, "Неустрашимый" сыграл важную роль в развитии отечественного кораблестроения.

Крупносерийное строительство эскадренных миноносцев началось с 1956 г., после сдачи ВМФ головного корабля пр.56 "Спокойный". В проекте эскадренного миноносца "Спокойный" был учтен ряд замечаний, имеющих место в пр.41 и не позволивших развернуть серийное строительство по этому проекту. По пр.56 эсминцы строились одновременно на трех судостроительных заводах (в Ленинграде, Николаеве, Комсомольске-на-Амуре) в течение 15 лет. Всего было построено 27 кораблей этого типа.

В качестве примера корабля крупносерийной постройки заметным событием в отечественном кораблестроении этого периода стало создание сторожевого корабля пр. 50 (головной корабль серии "Горностай").

Основным побудителем творческой мысли того времени явился опыт минувшей войны и новые достижения в области совершенствования оружия, вооружения и техники, которые появились в результате ускорения технического прогресса в военное время. Но несмотря на то, что строительство кораблей вследствие этих причин в тот период шло в основном по пути эволюционных преобразований, нельзя недооценивать те успехи, которые были достигнуты в решении научно-технических и инженерных задач в области выявления перспективных направлений развития военного кораблестроения.

В эти годы в области проектирования кораблей успешно работали академик В. Л. Позднов и профессор А. И. Балкашин. В их трудах и трудах их предшественников были приведены в стройную систему принципы, способы и методы проектирования кораблей и судов. Задачи, решаемые в работах этих ученых,

нашли дальнейшее развитие в исследованиях В. В. Авица, С. А. Базилевского, Л. А. Гордона, В. А. Никитина, Л. М. Ногвида, А. Э. Цуккерберга и др.

Особое место в истории отечественного военного кораблестроения занимает период с середины пятидесятых до середины шестидесятых годов. В отличие от первого послевоенного десятилетия, к этому времени уже вполне созрели реальные возможности практического использования в военных целях научных открытий второй половины XX в.

Исследования и опытные работы, развернутые в поисках путей использования на флоте достижений научно-технической революции, нашли свое отражение в кораблестроительной программе 1956—1965 гг. Видное место в этой программе отводилось проектированию и постройке экспериментальных и опытных кораблей. Своеобразный характер носило серийное строительство, в ходе которого носились существенные изменения в исходные проекты. В то же время постройка кораблей по отдельным проектам прекращалась. Этappen в истории военного кораблестроения стало создание ракетных и газотурбинных кораблей.

Прогресс в области ракетостроения позволил приступить к разработке ракетных кораблей специальной постройки — ракетных крейсеров. Таким кораблем стал ракетный крейсер пр.58. Главным конструктором проекта был В. А. Никитин, главным наблюдающим от ВМФ — П. М. Ходков. Строительство кораблей велось на заводе "Северная верфь" в период с 1960 по 1965 г. Всего было построено четыре корабля. Головной корабль "Грозный" был заложен в 1960 г. и передан флоту в 1962 г.

Водонемное корабль составляло около 5000 т, скорость полного хода — 34 уз. Главным оружием крейсера являлись два комплекса П-35 противокорабельного управляемого ракетного оружия (УРО), разработанного под руководством генерального конструктора В. Н. Челомехи. Каждый комплекс состоит из счетверенной пусковой установки контейнерного типа, системы управления и восьми крылатых ракет.

Тяжелое вооружение состояло из двух зенитных ракетных комплексов (ЗРК) "Волна" и 2х2 76-мм зенитных орудий. Принятые

в проекте ракетного крейсера огневые средства ПВО качественно отличались от аналогичных средств, установленных на кораблях предшествующих лет. Они составили первое поколение средств ПВО надводных кораблей.

Торпедное и противолодочное оружие было представлено двумя трехтрубными торпедными аппаратами и двумя 12-ствольными реактивными бомбометами. Радиоэлектронное вооружение обеспечивало обнаружение и управление оружием крейсера. Кроме того, в его состав также входили станции общего обнаружения, навигационные РЛС, средства радиоэлектронного противодействия (РЭП). Целеуказание по подводным целям обеспечивалось гидроакустической станцией (ГАС) "Геркулес" с подъемно-опускным устройством.

В проекте крейсера был учтен опыт создания котлотурбинных установок, внедрена автоматизация тепловых средств, впервые решались вопросы снижения уровней акустического и теплового полей.

Другим кораблем, о котором следует упомянуть применительно к этому этапу развития кораблестроения, является большой противолодочный корабль пр.61. Главным конструктором корабля был Б. И. Купеченский, главными наблюдателями от ВМФ — В. В. Дашков и О. Т. Сафронов. Корабли строились серийно с 1959 по 1972 годы в Николаеве и Ленинграде. Всего было построено 19 кораблей. Головной корабль "Комсомолец Украины" был заложен в 1959 г., дан флоту — в 1962 г.

Водоизмещение корабля около 4000 т, скорость полного хода — 34 уз. На корабле так же, как и на ракетном крейсере пр.58, были установлены два ЗРК "Волна", артиллерия, торпедное и противолодочное вооружение. Подобным был и состав радиоэлектронного вооружения. Отличие в вооружении заключалось в размещении на корабле более совершенной ГАС "Титан" и противолодочного вертолета Ка-25 (главный конструктор Н. И. Камов). Это был первый случай применения вертолетной авиации на кораблях ВМФ. Вертолет Ка-25 создавался специально для корабельного базирования и был принят на вооружение в 1964 г.

Основной особенностью создания корабля пр.61 являлось применение на нем в составе главной энергетической установки газовых турбин. Это была первая газотурбинная установка в мире. Ее суммарная мощность составляла 72 000 л. с. Она включала два главных газотурбинных агрегата (ГТА) "М-3", каждый из которых состоял из двух газовых неравновесных турбин, работающих на реверсивной односкоростной спаривающей редуктор. Для создания такой установки потребовалось развернуть совершенно самостоятельную машиностроительную отрасль, решить целый ряд сложных технических задач, обеспечить высокую культуру производства и эксплуатации. Принятые в проекте решения оказались настолько удачными, что применялись в течение многих лет практически на всех газотурбинных кораблях мира.

В этот же период был разработан пр.1123 и по нему построены два первых атомных корабля отечественного флота — "Москва" и "Ленинград". Значительное развитие получили противолодочные и противоминные корабли, создавались новые проекты катеров, в том числе ракетных. Продолжалось становление и совершенствование классов десантных кораблей и вспомогательных судов.

В целом, в течение второго послевоенного десятилетия была заложена основа для создания в нашей стране атомного ракетно-ядерного океанского флота.

Сложившаяся к началу 70-х годов военно-политическая обстановка в мире требовала дальнейшего укрепления Военно-Морского Флота. Для обоснования направлений его развития проводились широкомасштабные исследования и проработки. В этих исследованиях учитывались ближние и дальние перспективы совершенствования средств, форм и методов вооруженной борьбы на море, достижения научно-технического прогресса в военном кораблестроении и ряд других факторов, влияющих на формирование технической политики строительства Военно-Морского Флота. Эти работы способствовали дальнейшему развитию теории проектирования.

С середины 70-х годов начался новый этап развития методов учета экономических факторов при создании кораблей. Этим

вопросам были посвящены работы Л. Б. Бреслава, А. А. Нарубаева, А. В. Пана, В. Е. Садатова и др. Несколько позже стали появляться работы, широко использующие идеи математической теории оптимизации (исследования операций) в терминах военно-экономического анализа. Наиболее известными из них являются работы И. С. Водина, И. Я. Динера, Э. Е. Лисенкова, М. М. Меленевского, В. М. Пашова, М. М. Четвертакова, В. В. Щитова и др. Работа американских кораблестроителей Ф. Мендела и Р. Леопольда "Методы оптимизации, используемые при проектировании корабля", изданная в 1966 г., также являлась определенным шагом в развитии теории проектирования.

Попытки приложения общей теории оптимизации к проектным задачам, в свою очередь, побуждая исследователей вернуться к вопросам математического моделирования свойств проектируемых кораблей с тем, чтобы связать показатели боевой эффективности и экономических затрат с проектными и конструкторскими решениями, характеристиками устанавливаемых на корабль оружия, вооружения и технических средств. Этому направлению в наибольшей степени отвечают работы А. М. Ваганова, Е. П. Знамеровского, Б. А. Колышева, И. М. Короткина, А. И. Косорукова и др.

Из работ зарубежных авторов в эти годы заметной стала книга Т. К. Джилмера "Проектирование современного корабля", изданная на русском языке в 1984 г.

В этот же период начинается бурное развитие электронно-вычислительной техники. Практически сразу же, как только в распоряжении исследователей оказались достаточно работоспособные вычислительные устройства, начинается работа по созданию автоматизированных систем исследовательского проектирования кораблей. Однако понадобилось еще многие годы на то, чтобы роль и место такой систем в процессе создания корабля были четко очерчены, специально определены их возможности. Теории построения автоматизированных систем проектирования посвящены работы В. С. Дорина, Ю. Н. Семезова, П. А. Шауба и др.

Со временем на базе полученных теоретических результатов повышается работа, посвященные упорядочению положений теории и систематизации наработанных методов. Ранее созданные теоретические средства трансформируются применительно к новым возможностям вычислительной техники. Под влиянием идей системного подхода теория проектирования приобретает контуры вполне сформировавшейся научной дисциплины. Все большее место в ней занимает приложения общей теории принятия решений. К таким работам можно отнести труды В. В. Ашеника, Г. И. Попова, Л. Ю. Худякова и др.

На базе развивающейся теории создавались проекты принципиально новых кораблей. Важным фактором в определении технической политики строительства флота рассматриваемого периода стала боевая служба кораблей в удаленных от баз районах. Накопленный опыт использования кораблей существенно повлиял на различные стороны теории и практики военного кораблестроения. Так, выявилась необходимость в более интенсивном использовании кораблей, увеличении дальности и продолжительности походов и, следовательно, в повышении надежности кораблей. Возросло значение задач обеспечения боевой устойчивости, связанных с усилением противовоздушной и противолодочной обороны, повышением скрытности по физическим полям. Стала очевидной потребность в совершенствовании средств обнаружения и искажения, развития систем автоматизированного управления, усилении защиты и боевой протекции и повышении живучести. Увеличение автономности плавания обусловило необходимость улучшения обитаемости кораблей.

К середине 70-х годов завершилось создание первого в стране авианесущего корабля, способного обеспечить базирование самолетов. Этим кораблем стал "Косяк", пр.1143. Корабль предназначался для поиска и уничтожения подводных лодок, нанесения ракетных ударов по надводным кораблям. Главным конструктором корабля был А. В. Маринич, главным наблюдателем от ВМФ — О. Т. Сафронов.

Водонесущие корабли — 38 000 т, скорость полного хода — около 30 уз, Основное вооружение корабля составляли самолеты вертикального взлета и посадки Як-38 и вертолеты

Ка-25 (всего 36 летательных аппаратов). Однако на этом корабле еще не удалось в полной мере реализовать преимущества корабельной авиации, поэтому на "Киеве" размещались также 16 крылатых ракет большой дальности. Остальное оружие и вооружение отвечало уровню своего времени.

Вслед за "Киевом" началось срочное строительство адмиральских кораблей семейства пр.1143. Однако по мере накопления опыта строительства и эксплуатации кораблей этого класса, каждый последующий корабль представлял собой модификацию предыдущего. Так, в 1975 г. был передан флоту "Киев", затем "Минск", "Новороссийск", "Баку" и, наконец, "Адмирал Кузнецов" (значительная часть кораблей впоследствии была переименована). На этом последнем корабле серии удалось решить задачу обеспечения базирования самолетов горизонтального взлета и посадки.

На смену ракетным крейсерам пр.58 пришли ракетные крейсера пр.1144 и пр.1164. Атомный тяжелый ракетный крейсер "Киров" пр.1144 стал первым отечественным надводным боевым кораблем с атомной энергетической установкой. Эта установка проектировалась на основе опыта создания главных энергетических установок атомных подводных лодок и позволяла крейсеру иметь практически неограниченную дальность плавания. Главным конструктором корабля был Б. И. Купенский, главным наблюдателем от ВМФ — А. А. Савин. Корабли строились на Балтийском заводе. Головной корабль был спущен на воду в 1980 г., всего построено четыре корабля.

Полное водоизмещение корабля составляло более 20 000 т, скорость полного хода — свыше 30 уз. Ударное ракетное оружие в составе 20 ракет размещалось в подпалубных пусковых установках, защищенных броневыми конструкциями.

Другим ракетным крейсером, построенным в начале 80-х годов, стал пр.1164 "Славя". Этот корабль, значительно уступает по водоизмещению (около 12 000 т) и ударным возможностям кораблю пр.1144. Его основное вооружение представлено комплексом ударного ракетного оружия в составе 16-и крылатых ракет, размещенных побортию в 16-и пусковых палубных установках. Главным конструктором проекта был А. К. Перьков (в даль-

нейшем В. И. Мутухин), главным наблюдателем от ВМФ — А. Н. Блинов. Головной корабль построен в Николаеве в 1982 г.

На этих двух типах ракетных крейсеров завершается линия специализированных ракетных кораблей. Начиная с 80-х годов все отчетливее проявляется тенденция к созданию многоцелевых надводных кораблей основных классов, характерная для всего мирового кораблестроения. Вследствие к реализации этого направления подошли и разработчики третьего поколения эскадренных миноносцев (больших противолодочных кораблей). Наиболее яркими последними представителями специализированных кораблей этих классов стали эскадренный миноносец пр.956 и большой противолодочный корабль пр.1155. Эти корабли создавались практически одновременно (головные корабли серии вступили в строй в 1980 г.) с той лишь разницей, что пр.956 (головной корабль "Современный") был оснащен котло-турбинной энергетической установкой, а его основное оружие было ориентировано на нанесение ракетных и артиллерийских ударов по морским и наземным целям, а пр.1155 (головной корабль "Удолой") — газотурбинный с развитым противолодочным вооружением. Водоизмещение обоих кораблей около 7000 т.

За эти годы вполне сформировалась потребность Военно-Морского Флота в многоцелевых (на первом этапе — противолодочных) кораблях, но значительно меньшего водоизмещения, чем эскадренные миноносцы и, следовательно, меньшей стоимости (большой срочности). Первым таким кораблем стал сторожевой противолодочный корабль пр.1135 (головной корабль "Бдительный" спущен на воду в 1970 г.).

Представителем следующего поколения этого класса кораблей стал сторожевой противолодочный корабль пр.11540 (головной корабль "Неустрашимый"). Его проектирование было завершено в начале 80-х годов, строительство продолжается. Вооружение этого корабля позволяет ему решать уже значительно более широкий круг задач, чем его предшественнику. В этом смысле пр.11540 в гораздо большей степени отвечает замыслу на многоцелевой корабль и лучше вписывается в общемировую тенденцию развития надводных кораблей.



В рассматриваемый период значительно возросло количество классов надводных кораблей. Среди них следует указать такие, как малые противолодочные корабли (пр.1124), малые ракетные корабли (пр.1134), боевые катера (пр.1241-1), минно-тральные корабли: морские (пр.266М), базовые (пр.1265) и рейдовые (пр.1258) тральщики, десантные корабли (пр.1174) и другие. Очевидно, что проблема определения оптимального (скорее всего ограниченного) числа классов надводных кораблей также требует своего решения.

В результате за последние 20 лет благодаря усилиям многочисленных коллективов ученых, конструкторов и судостроителей был создан мощный океанский флот, представленный, в том числе, большим количеством боевых кораблей, обладающих значительным пусковым и ударным потенциалом и по своим тактико-техническим характеристикам не уступающим самым передовым мировым аналогам.

Пройденный восьмью кораблестроением путь говорит о всевозрастающей роли науки в создании кораблей Военно-Морского Флота. Наука в целом стала первым и неизменным условием достижения высокого уровня кораблестроения. С развитием различных направлений кораблестроительных наук, ростом производственных, технических и технологических возможностей по созданию перспективного оружия, вооружения и технических средств все большее значение приобретает теория проектирования кораблей, как системологическая дисциплина, призванная обеспечить наиболее эффективное внедрение всех достижений науки в практику кораблестроения.

## РАЗДЕЛ I ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДОЛОГИИ, ТЕОРИИ И ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НАДВОДНЫХ КОРАБЛЕЙ

### Глава I. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К СОЗДАНИЮ НАДВОДНЫХ КОРАБЛЕЙ

#### 1.1. МЕТОДОЛОГИЯ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА К ПРОЕКТИРОВАНИЮ НАДВОДНЫХ КОРАБЛЕЙ

Идея системного подхода в познании окружающего мира развивалась параллельно с развитием человеческой мысли. Сегодня о системном подходе следует говорить как о едином направлении в развитии современного научного познания. Главное основание для этого состоит в том, что все исследования, проводимые в рамках системного подхода, так или иначе направлены на изучение специфических характеристик сложноорганизованных объектов — систем [2]. Еще архаичнейшее положение: "Целое больше суммы его частей" несет в себе выражение системной проблемы. Системным подходом пользовались также Лейбниц, Гегель и многие другие математики и философы прошлого. В современном знании разработку системного подхода наиболее часто связывают с именами таких известных исследователей, как Людвиг фон Берталанфи, Норберт Винер, Герберт Саймон, У. Росс Эшби, М. Д. Месарош. В то же время значительная часть развиваемых сегодня идей этого направления так или иначе связана с работами отечественных ученых, прежде всего А. А. Богданова (например, "Всобщая организационная наука. Текстология"). Широко также известна методологическая школа под руководством Н. В. Блауберга, сложившаяся в конце 60-х годов (В. Н. Садовский, Э. Г. Юдин и др.). Большой вклад в становление системного подхода внесли Н. П. Бусленко,

Ю. В. Гермейер, П. С. Краснощеков, Н. Н. Монахов, Д. А. Поппелов, А. И. Уемов и ряд других наших ученых. Одновременно с выработкой основных концепций и попыткой осуществить попытки формализовать идею системного подхода, создать так называемую "тепталитматематику", в основе которой лежало бы не количество, а отношение, т. е. форма и порядок [27]. Именно из-за отсутствия таких формальных методов, способных описать системный подход, он на протяжении длительного времени оставался лишь философской проблемой, а не научным направлением. Одной из первых наук, в которой объекты исследования стали рассматриваться как системы, являясь биологией. В биологии организма внимание исследователей все более перемещалось от отдельных процессов к их взаимодействию. Помощью путей решения этой задачи привело к формированию системного подхода в биологии, получившего различные конкретные воплощения в работах Н. А. Берштейна, В. И. Вернадского, У. Росс Элиби и других ученых. Позднее многие известные исследователи системного подхода неоднократно возвращались к его интерпретации в области биологии (например, В. Вольтерры, М. Д. Месарович, Д. Николас), однако первый шаг в этом направлении, по-видимому, удалось сделать Л. Берталанфи. В 30-е годы им впервые были опубликованы основные положения "Общей теории систем" под которой он понимал "логико-математическую область исследований, задачей которой является формулирование и выведение общих принципов, применимых к "системам" *etcetera*..." [28]. Так вытекала схема общей теории систем и со временем у нас стали появляться сокращения. В отдельных работах добавляются имена таких первооткрывателей тепталитматематики, как В. Коппер, А. Лотка, У. Росс Элиби и др. Наибольшего расцвета идея создаваемого направления достигла к середине 50-х годов, когда создаваемые направления достигли к середине 50-х годов, когда Л. Берталанфи совместно с А. Рапопортом, К. Боудингом и Р. Жорданом основали "Общество исследований в области общей теории систем" (с 1956 г. это общество именовалось "Обществом "Человек и Умения"). Методологически новая теория опиралась на понятие системы как сложнорганованного объекта, а в ее понятие системного инструмента предполагалось использо-

вать абстрактную алгебру (Ю. Ланге), теорию множеств (М. Д. Месарович) и математическую логику (А. И. Уемов).

Однако, как это показали последующие события, новое направление, зародившееся в теоретической биологии, оказалось большей частью неостребованным наукой середины 20-го столетия. Прикладные области исследования не были готовы к ее появлению и применению. В то же время в некоторых существенных пунктах идеи этой теории предшествовали появлению на свет двух других мощных теоретических направлений.

В 1948 г. профессор математики Массачусетского технологического института (США) Норберт Винер положил начало новой науке — науке об управлении — и дал ей название "кибернетика". Появление этой дисциплины, основы теории которой была разработана Н. Винером, было связано с бурным развитием техники и прежде всего автоматических устройств. Пройдя в 50—60-е годы нелегкую адаптацию в отечественной науке, кибернетика давно занимает почетное место среди других научных направлений, впитав в себя наряду с классическими результатами теории автоматического регулирования основные идеи и положения системного подхода. Представила книгу У. Росс Элиби "Введение в кибернетику" русскому читателю. А. Н. Колмогоров в 1959 г. писал: "...Кибернетика занимается изучением систем любой природы, способных воспринимать, анализировать и перерабатывать информацию и выполнять ее для управления и регулирования" [40]. Таким образом, новая дисциплина, появившаяся в результате потребностей практического использования, по своей сути также являлась системной теорией, но в большей степени, чем общая теория систем, ориентированной на такие понятия, как информация и связь.

Примерно в те же годы, когда появляются первые работы по кибернетике, в Нью-Йорке выходит фундаментальный труд Ф. М. Морза и Д. Е. Кнэбелла "Методы исследования операций". Стучилось так, что именно эта работа дала толчок к развитию и имя еще одной новой теории — исследованию операций. Эта теория, так же, как и кибернетика, повсюду в результате настоятельных требований практики и содержит существенный системный аспект. Однако в отличие от кибернетики

исследование операций отражается на методологиче-ски версионных задачах и для их решения использует самостоятельную аксиоматическую базу (критериальный подход).

В нашей стране впервые задача исследования операций была поставлена и решена в интересах деревообрабатывающей промышленности Л. В. Канторовичем в 1939 г. Несколько позже, в 1940 г. аналогичные решения были получены в Великобритании. Новая теория быстро была подхвачена в США сначала применительно к военным задачам, а затем с успехом стала применяться в финансовом деле, промышленности и гражданском управлении. Впоследствии история развития исследования операций была подробно описана Третьяком и Мак-Клюски. Не осталась безучастной к новому направлению и наша наука. Большую известность приобрели труды таких наших ученых, как Е. С. Венциль, Ю. Б. Герштейн, Ю. Г. Егущенко, Н. Н. Моисеев и другие. В 1975 г. Л. В. Канторовичу и Т. Кушману (США) за вклад в теорию оптимального использования ресурсов была присуждена Нобелевская премия.

В настоящее время существует множество работ, посвященных задачам исследования операций, строго сформулирована математическая задача оптимизации, но при применении теории к большим и сложным системам исследователи столкнулись с серьезными трудностями. Такого же характера трудности подстерегали исследователей при попытке распространить на крупномасштабные и многовариантные системы вычислительские подходы. Эта ситуация сложилась к концу 60-х годов, но она принципиально отличалась от той, которая была описана выше и представляла повышенную когерентность и исследованию операций. В эти годы потребность в создании более общей, чем кибернетика или исследование операций, системной теории диктовалась непосредственно практикой, отвечающей происходящей в те годы технической революции.

Наиболее сильное влияние на формирование новых подходов к разработке системного направления оказали созданные в эти годы крупные энергетические комплексы, развитие авиационной, космической и ракетной техники, освоение атомной энергии, интенсивное развитие транспорта, резкий рост объ-

емов передаваемой и обрабатываемой информации. За период своего последнего более чем двадцатилетнего развития системное направление актуализировалось в таких новых, ранее не решаемых глобальных задачах, как система ядерной безопасности, устойчивость организационно-технических комплексов, экологическая безопасность, охрана окружающей среды и многих других. При этом фактором, благоприятствующим развитию нового направления, стало интенсивное развитие электронно-вычислительных средств.

Изложенные обстоятельства требовали, с одной стороны, привлечения для решения практических задач все более широкого спектра эффективных инструментальных средств, а с другой — более четкого понимания методологических и теоретических вопросов системной проблематики в целом. Очевидно, что решить эту задачу путем создания единой общей теории систем, как это предлагал Л. Берталини, уже не удавалось. Выход из создавшегося положения наметился только в конце 80-х годов. Эта идея неоднократно высказывалась на различного рода конференциях и семинарах, в статьях и монографиях видных системологов. Суть ее заключается в выделении из общего направления системного подхода только тех теоретических вопросов, решение которых может быть обеспечено инструментальными средствами, не принадлежащими к какому-либо другому области знания. Эти теоретические разделы системной проблематики, дальнейшим получив название конструктивных элементов системного подхода. На их базе стали формироваться методы решения практических задач, по своему характеру отвечающие методологии системного подхода. Все разработываемые или привлекаемые на этой основе методы объединились в единую теорию, получившую по аналогии с известными из математики функциональным анализом название "Системный анализ". Таким образом, включая по определению все конструктивные элементы системного подхода, системный анализ объединил все теоретические достижения, созданные к настоящему времени в интересах решения системных задач. Помимо системных аспектов задач автоматического регулирования и робототехнических задач, теории и методов исследования операций и оптимизации

сегодня в системный анализ входит также теория игр, теология имитационного моделирования и искусственного интеллекта и т. д. В дальнейшем этот список несомненно будет продолжен.

Что же касается более общих теоретических разработок, то самым скорейшим дисциплинирующей и классификационным, чем конструктивным характером, то тот задел на теоретико-множественном уровне, который был сделан в середине 60-х годов, мог бы плодотворно развиваться, оставаясь в рамках методологического направления системного подхода. Это позволит сохранить необходимую общность и полноту рассуждений, более глубоко проникать в системную сущность явлений на понятийном уровне.

Практическая потребность в применении системного подхода при проектировании кораблей стала проявляться сравнительно недавно как следствие интенсивного развития всей научной, технической и технологической базы. Иными словами, многообразие боевых и технических средств, создаваемых для кораблей, и сложность их взаимодействия при функционировании обуславливают необходимость рассмотрения корабля во всей совокупной сложности взаимодействия его элементов, т. е. как единой системы. В то же время, необходимо отметить, что возникновение кораблестроения явилось одной из первых технических областей, в которой нашла применение и продолжают успешно развиваться идеи системного подхода. Это вполне объяснимо, так как такие основные функции системного подхода, как балансирование многих противоречивых составляющих частей и прогнозирование на большую перспективу ответственных и влекущих за собой огромные затраты решений, в полной мере могут быть реализованы именно в возникшем кораблестроении, где перечень основных поставок на корабль исчисляется тысячами, а время постройки корабля — годами. Вслед за возникшим кораблестроением идеология системного подхода была воспринята в ракетно-самолетостроении. Наиболее известные работы этого плана относятся к началу 60-х годов.

Слово системный подход и теоретические средства системного анализа общеприменимы в теории проектирования кораблей, как ее основанная историческая и теоретическая база. Ключе-

вым в методологии системного подхода является понятие системы. Длительное время на страницах печати велась дискуссия по выработке определения этого понятия в самом широком смысле его понимания. Этот вопрос оказался настолько сложным, что некоторые авторы [23] предлагали вообще не использовать такое определение и отказаться от попыток его создания. Возможно, с философской точки зрения это и оправдано, однако для развития прикладных направлений, и особенно конструктивных элементов системного подхода, необходимо иметь пусть более узкое, но вместе с тем конкретное определение. Такие определения выработывались в разное время в интересах различных прикладных областей, в том числе проектирования, и мы в дальнейшем будем использовать следующую обобщенную формулировку.

Под системой в самом общем смысле понимается некоторая совокупность элементов, связанных между собой и взаимодействующих с окружающей средой как целое.

В качестве центральных в системном проектировании рассматриваются такие понятия, как собственно система; подсистема — промежуточный элемент разбиения системы; элемент — конечный элемент разбиения системы; связь — физическое или информационное взаимодействие элементов системы между собой; структура — систематическое представление модели системы, определяющее отношение элементов. Здесь и далее (если безразлично, о промежуточном или конечном элементе разбиения системы идет речь) применяется термин "элемент".

Введенные в определение системы понятия элемента предполагают конечность разбиения системы и, следовательно, конечное число ее элементов. Если речь идет о многоуровневой организации, то тогда подразумевается конечность как числа элементов нижнего уровня, так и количества уровней иерархического разбиения. Правильным следствием конечности разбиения системы на элементы является утверждение о том, что система представляет собой не собственно объект исследования, а только его модель. Это утверждение вытекает из того, что в соответствии с основными точками зрения на бесконечность окружающего нас мира любой объект состоит из бесконечного числа

элементов и, следовательно, может быть разделен на бесконечное количество частей. В то же время известно, что наиболее важным приемом моделирования является выделение из образа моделируемого объекта только самых существенных с точки зрения интересов проводимого исследования составляющих этого образа. Оба эти обстоятельства определенно указывают на то, что понятием, описываемым с помощью данного выше определения, может быть только модель объекта, но не сам этот объект (разумно, речь не идет о бытовом употреблении слова "система"). Иными словами, здесь и в дальнейшем под системой мы будем понимать специальным образом построенную модель или просто системную модель.

Если модель носит функциональный характер, а мы будем, как правило, иметь в виду именно этот класс моделей, то под словом всегда будут пониматься функциональные зависимости, устанавливающие соответствие между переменными элементами системы, относительно которых говорится, что они связаны. Функциональные зависимости, отвечающие связям между элементами системы, соответствуют передаче от одного элемента другому информации, энергии или материальных объектов. При этом, если речь идет о передаче информации, то связи могут носить приоритетный или паритетный характер.

В отдельных источниках встречается указание на то, что отношение является более общим и охватывающим связь понятием. Чтобы не вводить дополнительных оговорок, мы будем разделять эти понятия и считать, что отношение представляет собой только качественную категорию, обеспечивающую упорядочение элементов системы. В этом случае понятие отношения и структуры устанавливается взаимно однозначное соответствие. Иначе можно сказать, что отношение является первым из рассмотренных нами конструктивных атрибутов системной модели, позволяющим отличать ее от традиционных моделей функционального анализа. Введение в определение системы понятия отношения, как самостоятельного атрибута, указывающего на обязательную упорядоченность элементов системы, является принципиальным. Дело в том, что структура системы, обеспечивающая упорядочение ее элементов, является

некоторым "ключом", с помощью которого сохраняется перспектива восстановления системы как целостного образования после ее декомпозиции. Не установив такого порядка, нельзя рассчитывать на возможность получения целостных свойств системы на основе имеющихся свойств ее элементов. Образно говоря, как отмечал А. И. Уемов (359): "Куча зерна, хотя и содержит множество элементов, но не сохраняя порядок между ними, нельзя считать ее системой"

Присутствие в определении системы такого понятия, как отношение сразу, во многом проясняет методологическую канву системной постановки задачи. Считается, что декомпозиция системы должна проводиться таким образом, чтобы сложность решения задачи применительно к каждому элементу системы по сравнению с ее сложностью применительно к системе как целостному объекту снижалась в некотором соответствии с числом элементов разбиения. Тогда методологический смысл постановки многокомпонентных задач заключается в том, чтобы наращивать разбиение системы на элементы до тех пор, пока не будет достигнут такой уровень сложности в каждом элементе, при котором возможно обеспечить решение выделенной в элементе части задачи имеющимися средствами. При этом задача системных средств будет заключаться в обеспечении "монтажа" полученных в каждом элементе частных решений в общее решение задачи. Разумно, такая постановка сохраняет смысл только тогда, когда указанный "монтаж" системы удастся произвести, а получаемые при этом результаты оправдывают приложенные усилия.

Указание в определении системы на пару "система — среда" снова возвращает нас к необходимости трактовать систему как модель. Действительно, в окружающем нас мире не происходит какого-либо деления на объект и окружающий его мир, все части этого мира взаимосвязаны и неотделимы друг от друга. Однако с точки зрения методологии исследования такой подход сделал бы невозможным изучение любого объекта или явления. Поэтому искусственно отделив объект исследования от среды, мы совершаем неадекватный акт моделирования (огрубление реальности), который и позволяет проводить необходимые исследова-

ния. В то же время, нулевые изолированной модели в целом ряде случаев оказываются настолько несоответствующим реальности, что лишает смысла само моделирование. Именно на это обстоятельство и указывается в определении системы, когда подчеркивается необходимость учета взаимодействия системы и среды. Различие же между этим взаимодействием и действующими между элементами системы связями заключается в том, что связи, как на это уже было указано, носят функциональный характер, тогда как взаимодействие между системой и средой описывается на уровне постоянных (исходных данных, начальных и граничных условий). Другими словами, взаимодействие системы и среды описывается с помощью вырожденных функциональных связей, т. е. чисел. Используя более образное выражение, можно сказать, что взаимодействие "система - среда" образуется в процессе вычисления объекта исследования системы на полностью связанного окружающего мира путем "перерезания" действующих функциональных связей, в результате чего последние вырождаются в значения функций в одной единственной точке, в которой они были "перерезаны". При этом следует иметь в виду, что представленные взаимодействия системы и среды в виде чисел совсем не означает, что при его формализации не могут участвовать функции. Введенное определение взаимодействия предусматривает лишь то, что те величины, которые выступают в качестве независимых (упреждаемых) переменных в системной модели, в описании среды могут присутствовать только как постоянные. Например, если в качестве аспекта среды моделируется морское волнение, а системная модель корабля содержит такие независимые переменные, как характеристики его оружия и вооружения, то модель морского волнения вполне может содержать функцию высоты волны от времени. Однако если модель, отражающая взаимодействие боевого корабля и среды обеспечения, рассматривается так, что боевые корабля, участвующий в качестве переменной в модели его боевой эффективности, одновременно является переменной в задаче, описывающей оперативно восстановленную боеготовность на корабле с помощью среды обеспечения, то в этом случае в качестве системы следует рассмотреть пару "корабль - среда обеспечения".

Наиболее общим, охватывающим частные случаи формальным представлением системы является понятие, определенное в теоретико-множественных терминах. На этом уровне система определяется как отношение на языке теории множеств [23]:

$$C = \{X\} \times \{Y\}, \quad (1.1)$$

где  $\{X\}$  - множество входов, а  $\{Y\}$  - множество выходов.

Из выражения (1.1) ясно видна относительность понятия системы, т. е. под системой всегда понимается избранный объект исследования; любые другие объекты, являющиеся на функциональном уровне системы, но не входящие в объект исследования, определяются как среда.

Относительность понятия системы значительно снижает многообразие аспектов задачи проектирования. Так, если сам корабль и всевозможное или тематическое средство, устанавливаемое на нем, рассматривать как систему различного уровня, то задачи проектирования, поставленные применительно к таким системам, будут идентичны. Действительно, если на корабле имеется универсальный ракетный комплекс, решающий задачи поражения морских и воздушных целей, а сам корабль предназначен для решения ряда боевых задач, то трудно видеть, что задачи проектирования этого комплекса и корабля в целом представляют собой задачи одного типа с той лишь разницей, что в одном случае объектом исследования будет ракетный комплекс, а корабль - средой, тогда как в другом случае системой будет корабль, а ракетный комплекс перейдет в категорию элемента.

Для конструктивного представления системы, исходя из которого стал бы возможен ее синтез, необходимо запись выражения (1.1) привести к более конкретному виду. В этом смысле различают два подхода в описании систем.

Первый предполагает представление системы в виде "черного ящика". Этот термин применяется в кибернетике при рассмотрении управляемых систем, механизмов образования выходов которых неизвестен. Такое описание оказывается полезным при изучении свойств исследуемой системы по отношению к окружающей среде и сводится к построению передаточной

функции  $F$ . Структура модели в этом случае представляется состоящей из одного-единственного элемента. Тогда (1.1) становится тождественным выражением

$$F: \{X\} \rightarrow \{Y\}. \quad (1.2)$$

Поскольку формула (1.2) отвечает системе с одним элементом, то такое ключевое понятие системного подхода, как отношение в системе, не реализуется. Поэтому в дальнейшем системы, модели которых отвечают выражению (1.2), будем называть простыми.

Второй подход предполагает описание внутренней организации, структуры системы, свойства ее элементов и взаимосвязей между ними. Основой создания такого описания является декомпозиция системы, т. е. разбиение системы на подсистемы и элементы в соответствии с некоторой заранее принятой структурой. Системы, обладающие развитой структурой, т. е. содержащие два и более элементов, в отличие от простых систем будем называть сложными.

Следует отметить, что если простая система отвечает такой идее системного подхода, как целостность, то сложная система отражает концептуальное положение о совокупности взаимосвязанных элементов. Таким образом, целостность и сложность системного представления находится в диалектическом единстве, обусловленном относительностью понятия системы, и получает конкретное выражение в рассмотренных выше двух основных подходах системного описания.

Для описания сложной системы необходимо располагать описанием ее структуры (морфологическим описанием) и описанием свойств элементов системы (функциональным описанием). Морфологическое описание системы представляет собой самостоятельную проблему, что требует рассмотрения на более конструктивном уровне. Это будет сделано нами в следующем параграфе. Функциональное же описание отражает процесс функционирования элементов и взаимодействие этих элементов между собой. В рамках первого подхода применительно к простой системе функциональное описание представляет собой передаточную функцию  $F$  (1.2). В сложной системе функциональное

описание должно включать как множество передаточных функций элементов  $\{F_i\}$ ,  $i \in \{I\}$ , так и все многообразие внутрисистемных связей.

Если рассматриваемая сложная система в результате произвольной декомпозиции представлена хотя бы двумя элементами, замыкающимися на один элемент верхнего уровня — систему, то исходя из основной идеи структуризации — установления порядка на элементах сложной системы, можно предполагать следующие типы внутрисистемных связей [225]:

$\gamma$  — координирующие сигналы от верхнего иерархического уровня к нижнему;

$\kappa$  — информационные сигналы (обратная связь) от нижнего уровня к верхнему;

$\mu$  — связывающие сигналы между элементами одного уровня.

Связи типа  $\gamma$  и  $\kappa$ , отвечающие отношениям  $\succ$  и  $\prec$  между элементами, назовем асимметричными, а типа  $\mu$  — симметричными.

Таким образом, передаточные функции элементов, учитывая введенное многообразие связей, в общем виде можно записать как

$$F_i: \{I_i \times U_i\} \rightarrow \{W_i \times U_i\}, \quad j \neq i, \quad i \in \{I\}, \quad (1.3)$$

где  $\{I_i \times U_i\}$  — множество входов;  $\{W_i \times U_i\}$  — множество выходов.

При отсутствии одноуровневых связей выражение (1.3) примет вид

$$F_i: \{I_i\} \rightarrow \{W_i\}. \quad (1.4)$$

В принятых ранее терминах для произвольной структуры передаточные функции элементов запишутся так:

$$F_i: \{X\} \times \{U_i\} \rightarrow \{Y_i\} \times \{U_i\}, \quad j \neq i, \quad i \in \{I\}. \quad (1.5)$$

Рассмотренные методологические элементы системного подхода к проектированию сложных технических систем, в частности таких как, боевые корабли, составляют лишь самые общие сведения о сложном и многогранном процессе, сопровождаемом созданием современного корабля. Однако именно методологические аспекты системной проблематики позволяют осуществлять наиболее глубокие и перспективные обобщения, дающие круп-

ные, стратегические результаты. Поэтому, обращаясь в последующих разделах настоящего учебника ко все более прикладным аспектам системного подхода, мы постоянно будем возвращаться к тем общим положениям, которые были изложены в настоящем параграфе. Ближайшей нашей задачей станет рассмотрение содержания математической модели корабля, элементов теории системного анализа при проектировании и основных положений теории принятия проектных решений.

## 1.2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОРАБЛЯ, ЕЕ СТРУКТУРА И ОПИСАНИЕ

Сложность подлинных процессов, происходящих в корабле, требует упрощенного его описания в виде некоторой модели. В самом общем случае различают модели:

- словесные;
- символические;
- физические.

Любая из указанных моделей отражает определенным образом объект моделирования, в данном случае — корабль, позволяя ответить на те или иные вопросы проводимого исследования. В процессе проектирования и строительства корабля используются все перечисленные типы моделей. Однако на этапе исследовательского проектирования, при решении задачи обеспечения тактико-технических характеристик (ТТХ) корабля используются исключительно символические модели, частным случаем которых являются математические модели.

Как это уже отмечалось в параграфе 1.1, методы теории проектирования создаются и развиваются в рамках общей методологии системного подхода, что обуславливает необходимость рассматривать специфический класс математических моделей — системные математические модели. Основной отличительной особенностью этих моделей является их многосвязность, находящая свое выражение в трех основных аспектах описания математических моделей исследовательского проектирования: функциональном, морфологическом и информационном.

Функциональное описание представляет собой совокупность аналитических, алгоритмических и других представлений, выражающих связи между зависимыми (управляемыми) переменными и независимыми, характеризующими свойства элементов модели, а также связи между этими элементами. Математические модели, обеспечивающие функциональное соответствие между зависимыми и независимыми переменными, получают название функциональных. Различают функциональные аналитические и алгоритмические модели. Из самого определения этих моделей следует, что аналитическими моделями являются такие модельные функции которых представлены совокупностью аналитических зависимостей (или их аналогов). Если же в модельной функции присутствует хотя бы один условный оператор перехода, то такая модель называется алгоритмической. Несложно заметить, что предложенное деление функциональных моделей на аналитические и алгоритмические находится в прямом соответствии с понятием непрерывности функций. Два этих подкласса вводится для того, чтобы подчеркнуть важность обеспечения непрерывности модельной функции для всего процесса моделирования. С методологической точки зрения обеспечение непрерывности модельной функции (или ее аналога) позволяет использовать при анализе математической модели корабля все мощи функционального анализа и прежде всего понятия первой, второй и более старших производных модельной функции, что несомненно повышает эффективность исследований создаваемых математических моделей. В свою очередь, реальные проектные (конструкторские) решения обычно носят сугубо дискретный характер и адекватно могут быть описаны только алгоритмическими моделями. Выделение аналитических и алгоритмических моделей в самостоятельные подклассы заставляет проектианта каждый раз обращать внимание на отмеченные методологические особенности и помогает ему правильно выбрать инструмент исследования.

Почти функциональных моделей в исследовательском проектировании находят широкое применение также так называемые нефункциональные (имитационные) модели. Идея построения моделей этого класса состоит в попытке получить ста-



тистические характеристики поведения моделируемого корабля (или какого-либо другого объекта) искусственным путем, не прибегая к дорогостоящим, а иногда и просто невозможным натурным испытаниям. В отдельных источниках эти модели называются также стохастическими (статистическими). Впервые основные принципы построения имитационных моделей были сформулированы в работе [397]. Позднее более четко определены предметное поле эффективного приложения моделей этого типа. Наиболее информативными имитационные модели оказываются тогда, когда, с одной стороны, исследуемый процесс представляет собой сложную зависимость большого числа случайных событий, а с другой — точность вычисления характеристик каждого из этих событий оказывается слишком низкой. В этом случае применение средних оценок случайных событий не приводит к удовлетворительному результату, а то время как прием имитационного моделирования лишен этого недостатка.

Поскольку в имитационных моделях на каждом этапе проводимого эксперимента имитируется какая-то одна реализация исследуемого случайного процесса, то в них непременно присутствует хотя бы один генератор случайных чисел. Действие этого генератора разрушает функциональную связь между независимыми и зависимыми переменными модели, что и обуславливало второе название этих моделей.

Среди функциональных системных моделей исследовательского проектирования кораблей следует выделить еще два важных класса моделей. Это модели анализа (прямая задача проектирования) и модели синтеза (обратная задача). Задачи анализа наиболее широко распространены в естественно-научных дисциплинах. Схема их построения отражает процесс исследования объекта или явления с момента наблюдения, выделения характерных особенностей, разработки способов их измерения до выявления обобщающего закона (закономерности). Для реализации этой схемы нужен как минимум сам объект (явление) для исследования. Если такой объект существует, а в проектировании в качестве него может выступать проект корабля, выполненный в той или иной степени подробности, то математическая модель анализа будет представлять функцию, аргументами которой

станут измеримые и наблюдаемые параметры проекта, а сама функция будет в некотором наперед заданном смысле количественно оценивать качество этого проекта.

Задачи синтеза используются исключительно в целях проектирования. По своей методологической сущности они представляют проектные модели, позволяющие предопределять с той или иной степенью достоверности облик проектируемого корабля, отвечающего некоторым наперед заданным свойствам. Здесь в качестве аргументов модельной функции выступают формализация задаваемых свойств, а сочетание полученных значений функций и ее аргументов дает необходимое количество информации для получения облика проектируемого корабля. В теории проектирования задача синтеза делится на две существенно различных подкласса задач: задачи направленного и ненаправленного синтеза.

Модели задач направленного синтеза в основном строятся на законах подобия (в общем случае аналогии). При этом новый корабль получается из одного или нескольких старых прототипов с использованием тех или иных правил пересчета в зависимости от того, какие изменения претерпевают свойства нового проекта по отношению к старому. Модели направленного синтеза также используют информацию о существующих аналогах, но в отличие от моделей ненаправленного синтеза трансформация их содержательного образа происходит целенаправленно, например, под воздействием целевой функции (критерия). Поэтому иногда ненаправленный синтез также называют производным.

Между моделями анализа и синтеза существует много общего и отличного. Поскольку эти классы моделей образуются на уровне методологического обобщения, то их различия можно увидеть порой на самых неожиданных аспектах средств. Например, информационную трактовку. Известно, что практически все модели анализа являются функциями многих аргументов. Это означает, что хотя бы формально в результате работы модели анализа происходит концентрация информации. Можно также сказать, что в результате такой концентрации увеличивается глубина наших знаний об изучаемом предмете (явлении), повышается их качество. Результатом работы модели

система является вся совокупность имеющейся в нашем распоряжении информации о проектируемом корабле, которую мы и трактуем как образ этого корабля. Однако информация о проекте корабля включает в себя как выходную информацию, полученную в результате вычисления модельной функции, так и почти всю входную информацию, за исключением только той, которая задавалась как требования к данному проекту. Поэтому с информационной точки зрения можно считать, что модель системы увеличивает исходное количество информации. Пренебрегает это за счет снижения достоверности модели, т. е. ухудшения качества исходной информации. Для сокращения иногда модели анализа называют "концентраторами", а модели синтеза "расширителями" информации. В дальнейшем мы еще вернемся к информационному описанию математической модели корабля.

После рассмотрения основных особенностей функционального описания математической модели корабля, можно предложить более общее определение. Это определение так же, как и данное в начале параграфа, не является универсальным, однако вполне удовлетворяет потребностям настоящей теории моделей и ее приложений к кругу задач военного кораблестроения.

Под функциональным описанием математической модели корабля мы понимаем совокупность математических зависимостей, графиков, графиков и таблиц, создающих образ корабля в физических содержательных терминах без несущественных особенностей.

В этом определении имеет место указание на самые важные отличительные особенности модели. Первой из них является то, что модель отражает лишь существенные особенности объекта моделирования. В силу философского представления любого материального объекта в виде совокупности бесконечного числа свойств и частей, на которые он может быть расчленен, моделирование всех без исключения особенностей корабля, очевидно, представляется неконструктивным. Однако, оставляя для рассмотрения только некоторую часть этих свойств или элементов деления (в определении особенностей), необходимо разработать критерий определения "существенных" аспектов моделирования. Такая постановка неизбежно приводит нас к понятию модели при

разработке математической модели корабля. Действительно, если существует критерий отбора существенных особенностей модели, значит должна существовать также цель ее разработки, в соответствии с которой она бы была построена этот критерий. Но иной цели создания математической модели, кроме проведения исследования, быть не может. Таким образом, мы приходим к утверждению о специальном характере построения математической модели корабля в зависимости от того, в интересах какого исследования она разрабатывается. Значит, нет и не может быть математической модели корабля вообще, а существуют лишь математические модели, например, исследования поведения корабля на волнении или оценки его боевых возможностей и т. п.

Для последовательного рассмотрения возможных типов специальных моделей используют понятие их классификации. Наиболее распространенной классификацией, которую используют в теории исследовательского проектирования корабля, является классификация моделей по уровню описания корабля (различных моделей). В соответствии с этой классификацией выделяют:

прогностические модели, разрабатываемые для прогнозирования развития боевых и технических средств, классов и типов кораблей в интересах формирования кораблестроительной программы;

модели, разрабатываемые для обоснования заданий на проектирование, создания системы требований, представляемых к свойствам кораблей;

модели, разрабатываемые в интересах эскизного и технического проектирования;

модели, разрабатываемые для обоснования объемов и сроков модернизации кораблей флота.

Помимо этого математические модели корабля можно разделить:

по характеру переменных (дискретные, непрерывные и смешанные);

по учету времени (динамические, статические и квазистатические), т. е. такие, в которых время присутствует как спонтанная и управляемая переменная;

— по степени учета случайных факторов (регулярные, квазирегулярные и статистические, иногда говорят нефункциональные или имитационные);

— по масштабу постановки задачи (модели функционирования сил флота, разнородных сил, однородных соединений, одного корабля и т. п.).

В то же время не следует думать, что математическая модель всегда создается только для одного какого-то исследования. Существуют математические модели, способные обеспечить целый спектр исследований в некоторой области, тогда говорят о степени консервативности модели.

Под консервативностью модели мы будем понимать ее способность к перенацеливанию от задач одного исследования к задачам другого исследования без затрат, сравнимых с разработкой новой модели. Как будет показано позднее, наиболее консервативными в исследовательском проектировании являются модели синтеза корабля.

Завершая рассмотрение этой важной особенности, нужно отметить, что представление модели как освоенной реальности возвращает нас к определению системы, данному в предыдущем параграфе. Конечно число элементов структуры системы, на которое указывается в этом определении, находится в прямом соответствии с ограниченным количеством особенностей моделируемого объекта, подразумеваемом в определении модели. Это дает основание еще раз указать на теоретическое представление системы как модели объекта.

Еще одной важной особенностью математической модели корабля является ее представление в физически содержательных терминах. Здесь речь идет о таком фундаментальном понятии методологии научного исследования, как адекватность. Под адекватностью модели всегда понимается совпадение результатов моделирования и наблюдаемых проявлений объекта или явления. Однако пути и способы оценивания степени адекватности моделей анализа и синтеза существенно отличаются. Более подробно этот вопрос будет рассмотрен в параграфе 1.5. Сейчас же необходимо только отметить, что поскольку в результате работы модели синтеза появляется образ нового корабля, а от-

личие от модели анализа, на основе которой мы получаем информацию о существующем корабле, понятие адекватности модели синтеза также существенно изменяется по сравнению с тем, которое традиционно используется применительно к моделям анализа. Однако с точки зрения соответствия математической модели физическим законам и явлениям существенных изменений при этом не происходит.

Наряду с функциональным описанием важное место в системном моделировании занимает морфологическое описание математической модели корабля. Под морфологическим описанием системной модели мы понимаем описание ее структуры, т. е. графическое или иное представление, задающее отношения на ее элементах, и схему действующих связей. Целью морфологического описания является задание отношений на элементах модели. Так, иерархическая структура устанавливает отношения типа "эквивалентность" и "предпочтение", а схема действующих на этой структуре связей позволяет образовать более полное их многообразие: "вложение", "пересечение", "совпадение", "замыкание" и т. д. Наличие многоэлементной структуры делает необходимым исследование принципов декомпозиции системной модели.

Очевидно, что разбиение системы на подсистемы и элементы можно осуществлять не единственным способом. В этой связи следует отметить, что сам по себе объект исследования (в данном случае корабль) не обладает какой-либо определенной структурой в терминах системного подхода (для, иначе говоря, обладает бесконечным множеством структур). Структурное представление, или морфологическое описание, это лишь способ разбиения сложной задачи на конечный ряд более простых задач. Вместе с тем не следует считать, что выбор той или иной структуры при создании модели корабля является исключительно "делом вкуса" исследователя. Каждый тип структурного представления системы обладает определенными, свойственными только этому типу особенностями, облегчающими или затрудняющими исследование системы в рамках поставленной задачи.

Есть все основания полагать, что сам корабль, являя его подсистема, а также организация процесса проектирования ко-

рабды являются многоуровневыми иерархическими системами, представляющими собой специальный случай целенаправленных систем (иногда в теории систем такие структуры называют встраиваемыми). Используя существующие работы по общей теории систем [225], можно предположить три основных возможных аспекта описания иерархических систем:

- уровень сложности принятия решений;
- принятый уровень абстракции;
- принятый уровень функционирования элементов.

Поскольку эти аспекты в работе [225] определяются аксиоматически и нуждаются в соответствующем обосновании. Тем не менее в дальнейшем нами будет рассматриваться именно эти три аспекта в силу того, что в настоящий момент они и никакие другие наши места в теории исследовательского проектирования. Иными словами, все существующие и любые мыслимые сегодня структуры математических моделей корабля так или иначе сводятся к этим трем основным аспектам описания.

Так, по Месаровичу, первому аспекту описания соответствует принцип разбиения системы на уровни (слои), второму — принцип разбиения на страты — стратификация и третьему — принцип разбиения системы на эшелоны — эшелонирование (в данном случае понятие эшелонирования употребляется в несколько ином смысле, чем это обычно принято в теории проектирования).

Для того чтобы иметь возможность оценивать равноценность использования того или иного принципа декомпозиции, необходимо рассмотреть их особенности.

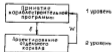


Рис. 1.1

**Уровни (слои).** Это понятие иерархии относится к процессам последовательного принятия решений. Подобный подход часто встречается при моделировании процесса проектирования корабля. Например, этот процесс можно было бы разбить

на уровни следующим образом (рис. 1.1). В качестве верхнего уровня рассматривается процесс формирования программы военного кораблестроения. Результатом решения задачи на этом уровне будет количество кораблей различных типов, принимаемых к созданию на программный период. Нижний уровень в этом случае будет представлен проектированием отдельного корабля каждого из рассмотренных на верхнем уровне типов.

Результаты решения задачи на верхнем уровне выступают как входные данные на нижнем уровне, а результаты принятия решения на последнем выступают как обратная связь на верхнем уровне. Поскольку решения на уровнях осуществляются последовательно, то все связи выступают в виде числовых данных, а сам процесс принятия решения носит итерационный характер.

Основным недостатком такого способа декомпозиции является неопределенность сходимости результатов. Действительно, в рассмотренном примере при решении задачи на верхнем уровне привлекается к решению в качестве входных данных определенный набор ТТХ корабля, который участвует в картине общей расстановки сил, в то время как решение нижнего уровня еще не получено. Затем, когда это решение поступает в виде обратной связи, нужно быть уверенным, что, осуществляя конечное число итераций, возможно обеспечить сходимость задачи. В противном случае решение считать удовлетворительным нельзя.

**Стратификация.** В данном случае система задается семейством моделей, каждая из которых описывает поведение системы на различных уровнях абстрагирования. Для каждого уровня существует ряд характерных особенностей, законов и принципов, с помощью которых и описывается поведение системы. Иными словами, каждая страта системы представляет собой не что иное, как саму систему, рассматриваемую исследователем под новым углом зрения. Иногда такой подход также называют аспектами.

Если учесть, что между различными стратами может существовать асимметричная зависимость, т. е. требования, предъявляемые к работе системы на высшей страте, выступают как условия или ограничения деятельности на нижележащих



Рис. 1.2

Подобное рассмотрение корабля чрезвычайно удобно тем, что на каждой страте описание производится с помощью выражений, уже созданных в соответствующих отраслях знания (оперативном искусстве, тактике, кораблестроительных дисциплинах, экономике). Трудности возникают лишь при описании связей между стратами, которое необходимо, так как совершенно очевидно, что оперативно-тактическое представление сильно зависит от ТТХ корабля, а ТТХ корабля — от экономического представления системы и наоборот. Учет таких связей представляет значительную сложность, поскольку это связано с созданием "гибридных" зависимостей, целью которых явилось бы обеспечение связи между отраслями знаний.

При наиболее эффективном стратифицировании, т. е. тогда, когда модель системы в наибольшей степени отвечает идее стратификации, между стратами действует незначительное число связей, что существенно упрощает описание. Примером такого стратифицирования может служить система, каждому элементу которой отвечает одна из возложенных на него боевых задач (рис. 1.3). В этом случае под-

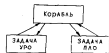


Рис. 1.3

страте /225/, то мы приходим к иерархической модели системы. В частности, при рассмотрении корабля как системы довольно часто применяется стратифицированное описание, а именно корабль представляют в виде трех страт /381/: оперативно-тактической, технической и экономической (рис. 1.2).

Эта декомпозиция получила название трехблочной модели. Подобное рассмотрение корабля чрезвычайно удобно тем, что на каждой страте описание производится с помощью выражений, уже созданных в соответствующих отраслях знания (оперативном искусстве, тактике, кораблестроительных дисциплинах, экономике). Трудности возникают лишь при описании связей между стратами, которое необходимо, так как совершенно очевидно, что оперативно-тактическое представление сильно зависит от ТТХ корабля, а ТТХ корабля — от экономического представления системы и наоборот. Учет таких связей представляет значительную сложность, поскольку это связано с созданием "гибридных" зависимостей, целью которых явилось бы обеспечение связи между отраслями знаний.

При наиболее эффективном стратифицировании, т. е. тогда, когда модель системы в наибольшей степени отвечает идее стратификации, между стратами действует незначительное число связей, что существенно упрощает описание. Примером такого стратифицирования может служить система, каждому элементу которой отвечает одна из возложенных на него боевых задач (рис. 1.3). В этом случае под-

система будет связана между собой только в силу возможного единства результатов решения одних боевых задач на другие. Такую декомпозицию в исследовательском проектировании обычно называют декомпозицией по боевым задачам. Нередко стратифицирование используют также для обеспечения возможности раздельного моделирования тех или иных свойств корабля с последующим интегральным представлением этих свойств /146/.

**Эшелонирование.** "То, что система состоит из взаимосвязанных подсистем и что эти подсистемы имеют иерархию, приводит нас к многослойной схеме" /225/.

Наверное, этот принцип декомпозиции — эшелонирование — наиболее часто встречается при разбиении технических систем. В самом общем случае эшелонированная система представляет собой совокупность элементов различных уровней, взаимосвязанных между собой. Характерной особенностью эшелонирования является то, что каждый элемент эшелонированной структуры представляет собой материальную часть системы, поэтому такой подход часто называют также объектным. Например, корабль при эшелонировании можно рассматривать как подсистему "носитель", содержащую корпус, главную энергетическую установку, электроэнергетическую систему, запас топлива и воды, массу обшкорокательных систем, бронирование и т. д., и подсистему "вооружение", включающую в себя комплекс управляемого ракетного оружия, зенитные ракетные комплексы, авиационное вооружение и т. п. Такая декомпозиция в исследовательском проектировании получила название декомпозиции по функциональным контурам (рис. 1.4). Другим примером эше-



Рис. 1.4

лонирования может служить система "корабль — суда обеспечения", при этом корабль рассматривается как подсистема, успешность функционирования которой в значительной степени определяется эффективностью сил и средств плавающего тыла (рис. 1.5). Разбиение системы непосредственно на материальные части исключает применение строго вертикальной декомпозиции, подобно тому как это делается при разбиении на уровни, и обуславливает наличие большого числа одноуровневых связей.



Рис. 1.5

Из приведенных определений принципов декомпозиции прямо не следует, каким образом необходимо проводить разбиение системы на подсистемы и элементы. Как уже отмечалось, корабль представляет собой иерархическую целенаправленную систему, каждый элемент разбиения которой преследует вполне определенную цель, не совпадающую в общем случае с целью вышестоящего элемента и с целью корабля в целом. Из сказанного следует правило разбиения системы на элементы одного уровня. В соответствии с этим правилом элементы объединяются в один уровень иерархии по признаку возможности соответствия каждому элементу своей отличной от других цели создания.

Правило распределения элементов одного уровня по предельным или иным целям берется за основу декомпозиции. Определяя второе правило декомпозиции системы (правило распределения элементов между уровнями), будем выбирать из системы элементы в подсистемы нижних уровней таким образом, чтобы в каждом иерархическом уровне структуры модели располагались только те подсистемы, которые связаны между собой только симметричными связями, т. е. связями типа  $\alpha$ . Подсистемы, связанные асимметричными связями, т. е. связями типа  $\gamma$  и  $\beta$ , будут располагаться в верхних или нижних уровнях относительно друг друга в зависимости от знака направленности асимметрии. Сформулированное выше правило будем называть вторым правилом декомпозиции.

Практически при декомпозиции технической системы оформленные правила реализуются как естественное деление каждой отдельно взятой подсистемы. Вместе с тем при построении математической модели всегда следует проверять их соблюдение. Например, если в качестве пары элементов выделить такие эшелонированные подсистемы корабля, как подсистему вооружения и только электроэнергетическую систему корабля, то решение задачи на такой структуре не даст ответ на основной вопрос проектирования: в какой степени должны быть удовлетворены интересы вооружения и носителя этого вооружения — остальной части корабля, включающей корпус, главную энергетическую установку, электроэнергетическую систему и т. п.

Таким образом, декомпозиция системы проводится в соответствии с двумя правилами. При этом видно, что первое правило отвечает декомпозиции в одном уровне, а второе — декомпозиции между уровнями.

Структура математической модели корабля может быть более сложной, чем можно представить с помощью какого-то одного принципа декомпозиции. Между тем сами принципы декомпозиции носят относительный характер. Так, возможна постановка задачи последовательного проектирования на таком основном принципе декомпозиции, как эшелонирование, однако задача подразумевает нахождение более высоких и более низких уровней декомпозиции (разбиение на уровни), а в каждом элементе системы применяется стратифицированное описание при моделировании элемента по трехблочной схеме /140/ (рис. 1.6). Возможно и смешанное структурное представление.

Поскольку разбиение на уровни предполагает сопоставимость (отделимость) решения задач, особый интерес представляет сравнительный анализ стратификации и эшелонирования. Эшелонированная структура по сравнению со стратифицированной обладает особенностью, для определения которой необходимо ввести еще одно важное понятие системного подхода. Будем говорить, что структурное представление обладает замыканием, если хотя бы в одном из выделенных элементов, например  $j$ -м, замыкающихся на один элемент верхнего уровня, су-

существует хотя бы одна независимая переменная  $x_i$ , для которой справедливо соотношение:

$$x_i = c(x, y), \quad i \neq j, \quad \text{для любого } i \in \{J\}, \quad (1.6)$$

где  $c_j$  — некоторый оператор замыкания, а  $x_i$  и  $y_i$  — независимые и зависимые переменные  $i$ -го элемента соответственно.

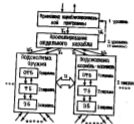


Рис. 1.6

Условие (1.6) определяет замыкание системы по уровню, причем этим свойством обладает только эшелонирование. Действительно, если корабль в соответствии с принципом эшелонирования разделить на такие элементы, как оружие и платформа-носитель этого оружия, то масса всего оружия составит массу полезной нагрузки корабля и определит, например, длину корабля, выступающую в качестве зависимой переменной платформы-носителя. При стратифицировании в каждом элементе рассматривается весь корабль, поэтому стратифицированная структура замыканием не обладает.

Наличие замыкания при эшелонировании приводит к двум существенным последствиям. Во-первых, противоречия между элементами, функционирующими в условиях замыкания, становятся более жесткими и, следовательно, простейшая задача более конструктивной. Другой особенностью замыкания является

то, что при разбиении материально целостной системы на страты и эшелоны по одним и тем же целям в эшелонированной структуре всегда окажется хотя бы на один элемент больше. Этот элемент не отвечает функциональному прованису системы и поэтому отсутствует в стратифицированной модели. При эшелонировании ему соответствует роль обслуживания функциональных элементов. Такие элементы в дальнейшем будут называться сервисными. С методологической точки зрения сервисный элемент обеспечивает целостность системы при эшелонировании.

Примером, иллюстрирующим последнюю из рассмотренных особенностей структуризации, может служить модель корабля, решающего задачу нанесения ракетного удара по морской цели и задачу борьбы с подводными лодками противника. При стратификации система должна разбиваться на два элемента, каждому из которых соответствовала бы боевая задача, решаемая кораблем (см. рис. 1.3). В случае эшелонирования структура системы будет состоять из трех элементов, причем два из них в виде функциональных контуров будут соответствовать элементам стратифицирования, а третий должен выполнять функцию обслуживания первых двух. При этом третий элемент будет представлять собой платформу-носитель вооружения (см. рис. 1.4).

Как уже отмечалось в параграфе 1.1, одним из существенных элементов определения системы является указание на взаимодействие ее с окружающей средой. При этом, под системой всегда понимается объект исследования, представляемый функционально связанной математической моделью. Выделение же системы из среды производится за счет вырождения функциональных связей, повсеместно действующих в реальном мире. Как известно, вырожденная функция представляет собой числовое значение этой функции в одной единственной точке. Вся совокупность таких числовых значений образует информационное описание системы, иначе говоря, описание среды.

Трехконтурная информационного описания чрезвычайно широка. Это связано как с широтой самого понятия информации, так и с тем, что понятие среды вводилось нами на основе принципа

замыкающего дополнения, т. е. "всё, что не является системой, является средой". Существуют различные интерпретации информативного описания, встречающиеся при решении задач исследовательского проектирования.

Одна из них связана с представлением информативного описания математической модели в виде границы между системой и средой, т. е. в виде некоторой "оболочки", окружающей модель. В этом случае говорят, что среда описывается на минимальном или низшем уровне адекватности действительности. Вслед за "оболочечным" представлением информативного описания возникает "оболочечная" конструкция самой математической модели. Ее суть отражает такую особенность многокомпонентной модели как то, что ее функциональное поведение не обладает одинаковым уровнем адекватности применительно ко всем своим фрагментам. Это связано с тем, что, как уже отмечалось выше, математическая модель всегда носит специальный характер, нацелена на решение конкретной задачи исследования. При этом каждый раз значимыми становятся свои, определенные отличительные признаки моделируемого объекта, другими же признаками пренебрегают. При изменении задачи исследования меняется и математическая модель. В этом плане довольно часто используется термин "проблемно-ориентированная" модель.

Проблемно-ориентированная модель в оболочечном представлении (рис. 1.7) характеризуется набором некоторых фрагментных "зон" или "оболочек", каждая из которых представлена

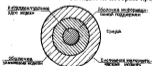


Рис. 1.7

модельными комплексами различного уровня адекватности (сложности, трудоемкости или разработанности). Наиболее

адекватной зоне оболочечной модели отвечает глубоко погруженное в предметную область исследования "интеллектуальное ядро" математической модели, т. е. те ее фрагменты, с помощью которых исследователь и надеется прежде всего получить ответ на поставленный перед исследованием вопрос.

Для обеспечения функционирования интеллектуального ядра необходима информация. В системно-связанной модели эта информация может быть получена с помощью математических моделей аспектов или частей исследуемого объекта, которые сами по себе не интересуют исследователя, т. е. не являются "существенными" в данном исследовании. Модели этих фрагментов системы составляют оболочку "информационной поддержки". Наконец, системная модель должна удовлетворять требованиям целостности, т. е. обеспечивать замыкание всего модельного комплекса. Модельные компоненты, обеспечивающие выполнение этой функции, составляют оболочку замыкания. Распределение фрагментов математической модели корабля между оболочками и представляет собой ее информационное описание.

Другая интерпретация информативного описания уже рассматривалась нами выше применительно к понятию консервативности математической модели. Как правило модельный комплекс исследовательского проектирования состоит из совокупности моделей синтеза и моделей анализа. Как уже отмечалось, эти модели обладают существенно разной степенью консервативности. В то же время каждый аспект или подсистема корабля могут выступать и как фрагмент блока моделей анализа, и как синтетические модели. В этом случае информативное описание будет фиксировать распределение модельных фрагментов по степени их консервативности и, соответственно, принадлеж-  
ности к моделям анализа или синтеза.

Встречаются и другие варианты трактовки информативно-го описания. Например, в последнее время самостоятельное значение стали приобретать так называемые геометрические модели, описывающие корабль исключительно в терминах геометрии. Практическая потребность в моделях этого типа связана с использованием в компьютерной графике и моделированием результатов



работ в этой области в исследовательское проектирование. Специфические особенности получения, обработки и передачи графической информации поставили задачу информационного описания системных моделей и в этом плане.

### 1.3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА В ПРОЕКТИРОВАНИИ

При рассмотрении вопросов, связанных с созданием кораблей, оснащенных их оружием, вооружением, техническими средствами, как правило, используются такие термины, как "система", "сложная система" или "большая система". Причина повсеместного использования этой терминологии заключается в стремлении выработать какую-либо единую основу в создании разнообразных военно-технических объектов, складных одних с другими лишь по сложности их создания, устройства и функционирования. Сегодня такой основой стал системный подход. Системный подход, как и любое другое научное направление, содержит методологические и теоретические аспекты. Характеризуя его современное состояние, можно отметить, что в методологическом плане системный подход имеет существенно больший задел, чем в области теории. Во многом такое положение связано с тем, что методологические аспекты системного подхода разрабатывались задолго до создания аппаратных средств. Однако основной причиной, конечно, является все-таки отсутствие у широкого круга специалистов ясного представления о предметной области и средствах этой новой теории. Именно поэтому в настоящее время появилось большое количество научных работ, методологически опирающихся на системный подход и использующих его терминологию, но по своим аппаратным средствам и получаемым решениям ничем не отличающиеся от задач, решаемых вне системной методологии. Последнее обстоятельство вызывает сразу ряд отрицательных последствий. Во-первых, отсутствие ясного понимания отличительных особенностей аппаратных средств системного подхода не позволяет признать широкую научную деятельность специалистов в области системализации и обобщения достигнутых результатов системной теории. Во-вторых, затрудняется анализ и критическое

осмысление получаемых новых научных результатов. И наконец, не решается задача распространения системных результатов, получаемых в одной прикладной области, на другие области знания.

Процесс становления системной теории на основе формальных средств представляется достаточно сложным и продолжительным. Успех в этом направлении может быть достигнут только при условии согласованной и плодотворной работы достаточно широкого круга специалистов, нацеленной на формирование, описание и совершенствование теории и методов решения системных задач. При этом нельзя сказать, что актуальность разработок методологических аспектов системного подхода уходит как бы на второй план. Методология системных исследований была и остается основополагающим элементом этого направления. Однако на настоящем этапе, очевидно, необходимо сосредоточить усилия на упорядочении процесса совершенствования именно теоретических средств. Чтобы терминологически выделить аппаратные средства системных исследований во всего инструментария этого направления, в дальнейшем все конструктивные элементы системного подхода, т. е. те, которые вносят изменения в формальную запись задачи в результате представления ее в рамках системной методологии, будем именовать средствами системного анализа. А теория, в рамках которой разрабатываются эти средства, — теорией системного анализа.

Основополагающим понятием системного анализа, так же как и системного подхода, является понятие системы. Развитие же аппарата любой теории, находящее свое выражение в создании формального описания ее методов, является необходимостью решения задач, стоящих перед этой теорией. Задачи теории системного анализа формируются как необходимость раскрытия основных атрибутов определения системы (см. п. 1.1) для их последующего исследования. При этом можно выделить три основные группы задач, соответствующих трем основным аспектам описания системы (см. п. 1.2). Это задачи функционального, морфологического и информационного описания.

Функциональное описание представляет собой совокупность аналитических, алгоритмических и других представлений, вы-

ражающих связей между взаимосвязанными (управляемыми) переменными и переменными, характеризующими свойства элементов системы, а также связи между этими элементами. При этом из самого названия и определения функционального описания следует, что нефункциональные (имитационные) системные модели самостоятельной теорией не обеспечиваются. Это, разумеется, не означает, что имитационным моделированием не следует заниматься вообще. Сам прием имитационного моделирования сохраняет свою актуальность и привлекательность в приложениях к исследовательскому проектированию кораблей (см. п. I.2), а основная задача проблемы разработки этих моделей лежит в области информационной технологии.

С точки зрения системного анализа как междисциплинарной теории почти все вопросы, связанные с характеристикой свойств элементов системы, должны оставаться за ее пределами, в рамках прикладных дисциплин, таких, как строительная механика, теория корабля и т. п. По своей сути это вопросы математического моделирования свойств конкретных создаваемых объектов, будь то корабль или комплекс вооружения и военной техники. Исключение здесь будет составлять только один аспект описания свойств системы, отражающий такой атрибут ее определения, как целостность. Поэтому иногда системные модели называют также полными. (Можно встретить и другой термин — "замкнутые" модели, но это несколько иное понятие. Оно находится в таком же отношении к понятию полной модели, как понятие объекта к понятию модели. Понятие замкнутости подразумевает его применение к какому-либо параметру или фактору, обеспечивающему "замыкание" элементов системы в единое целое. Понятие же полноты говорит не более чем о присутствии в модели всех модельных фрагментов, позволяющих создать целостный адекватный образ объекта, представляемого в виде системы.) Построение и исследование любого из элементов полной модели не составляет предмета системного анализа. Но методы и приемы выбора набора частных моделей целостного представления должны быть, отнесены к его теоретическим средствам. В теории проектирования корабля в качестве таких средств выступают методы определения его главных элементов,

представившие по сути модели синтеза образа проектируемого корабля. С содержательной точки зрения эти методы позволяют по мере нарастания сложности модели организовать синтез образа корабля на основе учета только тех составляющих нагрузок, затем расширяется совместное балансирование масс и вместимости помещений корабля, и, наконец, наиболее полный синтез обеспечивается, когда удаётся все эти условия совместить с формированием архитектурно-компоновочных решений. Если при использовании указанных методов реализуются только процедуры замыкания, то в этом случае обычно говорят, что реализуется "прямой" или "непрямой" синтез. Тогда же, когда формирование образа корабля идет целенаправленно с выходом на достижение определенного уровня основных его свойств, говорят о "целенаправленном" синтезе. Таким образом, методы, направленные на создание моделей синтеза объекта исследования, являются средствами разработки полных моделей. Сегодня в этой области создается много новых интересных методов, обычно относящихся к теории проектирования, но, безусловно, выходящих в более широкое системное приложение.

Что касается задачи описания действующих в системе связей, то этот вопрос не решается однозначно. При системном анализе помимо связей, действующих в математических моделях неистинного представления, всегда отдельно рассматриваются так называемые системообразующие связи. Деление это довольно условно, но оно позволяет в процессе моделирования таких связей выделять определенные аспекты системной проблематики. Основной отличительной особенностью системообразующих связей является их "гибридный" характер, т. е. то, что они объединяют фрагменты математических моделей, разработанных в рамках различных областей знания.

Здесь необходимо отметить, так как в связи с неустойчивой в настоящее время терминологией довольно часто отождествляются понятия системообразующих и так называемых эмерджентных связей. Мы будем считать, что если системообразующие связи с содержательной точки зрения представляют собой междисциплинарные функции, то эмерджентные возникают на уровне таких системных эффектов, содержатель-

ная сторона которых в терминах функционального анализа не находит объяснения. В качестве примера эмерджентных связей можно привести широко известный эффект способности ориентации в пространстве крупных популяций рыб, в то время как каждая в отдельности рыбная особь никаких элементов меланхолизма ориентации в своем организме не имеет.

Примерами системообразующих связей может служить модель оценки влияния дальности действия гидроакустической станции через массогабаритные характеристики акустической системы на гидродинамические характеристики корабля и впоследствии на его акустические характеристики, которые, в свою очередь, снова влияют на дальность действия гидроакустической станции. Или модель исследования взаимодействия электромагнитных полей корабля, генерируемых самими радиосборными источниками: радиолокационными станциями, системами управления оружием, станциями РЭБ, оборудованном летательных аппаратов, электрооборудованием корабля, его размагничивающим устройством и, наконец, переносимом самом корпусе. При этом, как уже отмечалось, применительно к математическим моделям элементов системы, связываемых фрагменты моделей непосредственно не принадлежит к задачам системного анализа, но методы и подходы к организации связей между такими фрагментами могут носить достаточно общий характер, чтобы распространяться на другие случаи. Последнее и позволяет считать методы формирования системообразующих связей средствами теории системного анализа. В настоящее время методы построения гибридных связей находятся на самом начальном этапе развития. Это направление системного анализа в основном представлено результатами, полученными в ряде частных задач на уровне оригинальных приемов моделирования. Вместе с тем уже сейчас можно сказать, что формирование системообразующих связей в общем случае происходит на двух уровнях: параметрическом и функциональном. Первый, наиболее очевидный, уровень реализуется путем передачи из одной модели в другую таких идентичных параметров, как физические, геометрические или массовые характеристики. Реализация сис-

темообразующих связей на втором уровне происходит, как правило, на основе таких понятий, как энергия, информация и т. п.

Что касается эмерджентных связей то, поскольку применительно к теории системного анализа мы говорим только об инструментальных средствах моделирования, а понятие эмерджентности, как правило, связывается с некоторым непосредственно наблюдаемым системным эффектом, то здесь и в дальнейшем будем считать, что понятие эмерджентных связей существует только на уровне методологии системного подхода. Как только эти типы связей удается формализовать и использовать в терминах математической модели, они сразу же переходят в класс системообразующих.

Помимо теоретических средств построения моделей системы и исследования системообразующих связей к инструментально функциональному описанию следует также отнести такие понятия, как редукционирование (п. 3.3), адаптация и агрегирование (п. 5.4). Эти средства системного анализа обеспечивают возможность трансформации исходных математических моделей, построенных вне системной методологии, к виду, позволяющему их использовать в качестве компонентов системного модельного комплекса.

Наиболее существенные специфические особенности в системных задачах вносит морфологическое описание. Под морфологическим описанием системы (см. п. 1.1) мы понимаем описание ее структуры, т. е. графическое или иное представление, задающее отношения на ее элементах, и схему действующих связей. Целью морфологического описания является задание отношений на элементах системы. Если функциональное описание раскрывается в системном анализе через такой системный атрибут, как связность, то морфологическое описание раскрывает понятие многоэлементности и структурности. Наличие многоэлементной структуры делает необходимым исследование принципов декомпозиции системы. Так, в предыдущем параграфе нами рассматривались такие основные принципы декомпозиции, как разбиение на уровни, стратификация и эшелонирование. Возможно получение дополнительного многообразия за счет применения смешанных принципов. Помимо задачи исследова-

ния принципов декомпозиции встает также вопрос о неоднозначности иерархического представления. По своей сути процесс декомпозиции системы и образования ее разнотипной структуры представляет собой замену одной сложной задачи семейством более простых задач. Особую значимость (часто говорят, сложность) при этом представляет операция получения интегрального отображения исследуемого объекта на совокупности его элементов. Эта сложность возникает уже при двухэлементном представлении системы в виде проблемы несвязности. Поэтому под сложными системами мы понимаем системы, структуры которых содержат два и более элементов. В отличие от сложных систем большие системы образуются в результате монотонного наращивания числа элементов структуры и получения в результате этого модальности нового качества. Иначе говоря, большие системы — это системы с очень большим числом элементов, когда влияние на поведение или образ системы каждого отдельного элемента пренебрежимо мало. Примером таких систем служат так называемые "поточные" модели [192]. Наряду с особенностями соотношения структур больших и сложных систем используются также такие понятия, как открытые и закрытые системы, распределенные и компактные. Последние, в свою очередь, делятся на системы мозаичного и аппаратного типов. Считается, что открытые системы отличаются от закрытых такой структурной организацией, при которой происходит более интенсивный обмен с внешней средой. Распределенные системы, в отличие от компактных, обладают несколько вырожденной формой замыкания, когда по тому или иному параметру (массе или геометрическим характеристикам) замыкающих ограничений не накладывається. Примером распределенной системы может служить система связи страны или транспортная система. Наиболее характерным для моделей исследовательского проектирования является использование, конечно, компактных систем. Если в компактной системе все элементы вносят примерно одинаковый вклад в ее синтез и этих элементов достаточно много, то говорят, что это система обладает мозаичной структурой. Если же синтез компактной системы определяется ограниченным числом наиболее значимых (узловых) ее элементов, то говорят, что система

имеет структуру аппаратного типа. Наиболее характерным примером мозаичной структуры является модель многоцелевого надводного корабля основного класса. К системам же аппаратного типа можно отнести подводные лодки, десантные и авианосные корабли.

Исследование принципов декомпозиции и способов иерархической организации систем требует новых аппаратных средств, разработка которых ведется уже на принципиально новых теоретических основах, нежели исследование свойств связности. Особенность этих теоретических подходов обусловлена тем обстоятельством, что, как уже отмечалось, здесь рассматриваются системный анализ только применительно к созданию таких новых объектов, как корабли, их комплексы вооружения и военной техники. Теоретическая задача создания непосредственно связана с задачей выбора предпочтительного варианта создаваемой системы, т. е. с задачей принятия решения на создание (принятия проектного решения). В настоящее время решение этой задачи реализуется в рамках общей теории принятия решений, однако наибольшее распространение в практике проектных исследований получили более специальные методы этой теории, построенные на основе механизма критерийного выбора и объединяемые теорией оптимизации. Последняя уже имеет достаточно развитые теоретические средства и применяется в целом ряде прикладных задач. Интересно, что существование связи между системным анализом и теорией оптимизации было выявлено сравнительно недавно [225]. Сущность ее заключается в установлении соответствия между морфологическим описанием системы, обеспечивающим распределение целей между элементами, и постановкой многокритериальной задачи оптимизации. Проблематика многокритериальной оптимизации включает в себя паретовский анализ и теорию принятия компромиссных решений на основе совокупности противоречивых частных оценок элементов системы. В свою очередь, в системном анализе в результате принесения целого ряда подходов и идей из теории оптимизации в последние годы получили развитие методы структурного анализа, используемые при разработке теоретических средств такие понятия, как симметричность и структурная

устойчивость (в случае ее утраты — катастрофа /93/), реализуемые в пространствах паретовских решений.

Исходя из определения, данного нами информационному описанию системной модели в предыдущем параграфе, можно было бы заключить, что этот аспект системного представления не обеспечивается какой бы то ни было самостоятельной теорией. Действительно, поскольку в общем случае под информационным описанием системы мы понимаем всю совокупность числовых значений, представляющих собой вырожденные значения функциональных связей между объектами системы и средой, то, очевидно, что построить какую-либо теорию с использованием средств функционального анализа здесь уже не удастся. В то же время интерпретация информационного описания с позиций оболочечной модели и его роль в определении степени консерватизма системного комплекса — все это так или иначе связано с задачей распределения информации между элементами системной модели, а следовательно, должно быть обеспечено соответствующими теоретическими средствами.

Например, как было показано в п. 1.2, проблемно-ориентированная модель в оболочечном представлении должна состоять из наиболее глубоко погруженного в предметную область "интеллектуального ядра", оболочки "информационной поддержки", замыкания и, наконец, непосредственно цифровой оболочки среды. При этом уровень описания модельных фрагментов, распределенных в различных оболочках системной модели, также будет различным. Так, иногда говорят, что среда описывается на минимальном или низшем уровне адекватности действительности. В то же время и функциональное описание системы не обладает одинаковым уровнем адекватности применительно ко всем фрагментам математической модели. Это связано с тем, что математическая модель всегда носит специальный характер, нацелена на решение конкретной задачи исследования. Каждой раз значимыми становятся свои определенные отличительные признаки моделируемого объекта, другими же признаками пренебрегают. При изменении задачи исследования меняется и математическая модель. Именно в этом смысле используется термин "проблемно-ориентированная" модель.

При реализации принципа проблемного ориентирования на практике нередко пользуются такими практическими рекомендациями, в которых для описания среды рекомендуется в качестве исходного уровня выбирать исходные данные, начальные и граничные условия, затем на уровне оболочки замыкания использовать линейные преобразования. В рамках модельных фрагментов информационной поддержки — алгебраические степенные зависимости и полиномы, а непосредственно в интеллектуальном ядре тот инструментальный уровень, который был достигнут при моделировании в той области знания, к которой и относится предмет исследования.

Иногда высказывается мнение, что недостаточная адекватность модельных фрагментов, лежащих на периферии интересов исследователя, может быть устранена по мере наращивания мощности вычислительных средств. Но это не так. На самом деле неравномерность распределения информации в модели является следствием основных законов познания окружающего нас мира и не связана с теми инструментами, которые мы при этом используем. Если бы это было не так, то вся модель адекватно отражала наблюдаемую действительность и тем самым представляла бы собой саму действительность. Исследовать которую мы смогли бы только на уровне созерцания реальности. Очевидно, что создавать подобные модели нецелесообразно.

Нахождение оптимального распределения информации в математической модели представляет собой самостоятельную системную задачу, требующую для своего разрешения специальных теоретических средств. Эти средства должны предоставлять возможность балансировать фрагменты системной модели по глубине их проработки, адекватности и потребности в исходной информации, участвовать в решении задачи определения рационального состава элементов системы, обеспечивать согласование внутрисистемных связей и позволять осуществлять эффективное выделение системы из окружающей среды. Разработка этих средств еще только начинается и направлена на создание гибких с точки зрения возможности проблемного переориентирования моделей систем автоматизированных исследований.

Таким образом, в последние годы под влиянием растущих требований практики исследовательского проектирования в общем направлении системного подхода интенсивно начали развиваться теоретические средства конструктивного описания систем, объединяемые в теорию системного анализа. Особую значимость развития данной теории для военного кораблестроения мы видим в возможности широкого распространения единой методологической и теоретической базы среди специалистов различного профиля ВМФ и промышленности, а также в повышении степени обоснованности проектных решений, принимаемых на ранних стадиях создания кораблей, комплексов их вооружения и военной техники в условиях ограниченных ресурсов.

#### 1.4. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ПРИНЯТИЯ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ

Математическая теория принятия решений, обеспечивающая решение проблемы выбора при создании сложных технических систем, какими являются корабли, комплексы вооружения и военной техники, составляет раздел системного анализа и реализуется на этапе направленного оптимального синтеза проектируемой системы. Возникла теория принятия решений (ТПР) как системное обобщение разрозненных попыток формализации акта выбора в таких прикладных дисциплинах, как вариационное исчисление, теория автоматического регулирования, теория игр, исследование операций и т. п.

В целом современная ТПР направлена на разработку теоретических средств, обеспечивающих разрешение проблемы выбора, возникающей при обосновании облика проектируемой системы. В самом общем виде описание задачи выбора может быть сделано посредством таких ее атрибутов, как предъявление, правило выбора, механизм выбора и модель выбора, объединяющая в себе три предыдущих элемента. Иногда говорят также о функции выбора, под которой понимают аспект внешнего проявления механизма выбора, т. е. систему типа "вход-выход".

Обычно действие модели выбора (рис. 1.8) представляется как процесс формирования предъявления в виде конечного множества альтернатив. Затем путем (в большинстве случаев) попарного сравнения, а в общем случае, следуя некоторой наперед заданной на элементах предъявления структуре, устанавливается

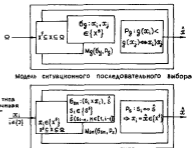


Рис. 1.8

факт неэквивалентности предъявленных альтернатив и вводится правило выбора, формализующее цель оперируемой стороны, с помощью которого осуществляется выбор предпочтительного варианта как результат работы механизма выбора.

Приведенная модель выбора является достаточно распространенной, но далеко не исчерпывающей все возможное многообразие. В общем виде задачу выбора можно было бы записать так: пусть задано некоторое множество вариантов, включающее все варианты, которые в принципе могут встретиться в рассматриваемой задаче выбора. Назовем его универсальным. Ситуация, в которой производится выбор, характеризуется множеством имеющихся в ней вариантов, называемым предъявлением.

Результатом решения задачи выбора будет множество вариантов, в каком-то смысле предпочтительных по отношению к другим вариантам представления. Процедура выделения подмножества из множества может быть записана в виде функции:

$$C: C(X) \subseteq \{X'\}, \quad (1.7)$$

где

$$\{X'\} = C(X), \quad \{X'\} \subseteq \{X\}.$$

Эта функция получила название функции выбора. С методической точки зрения кажется вполне естественным многообразие задач и, следовательно, моделей выбора получать путем рассмотрения многообразий ее атрибутов. Однако прежде чем приступить к такому анализу, необходимо отметить, что описанные до настоящего времени задачи выбора не обладают какой-либо полнотой представления. Кроме того, образование новых задач (моделей) происходит, как правило, не вследствие изменения какого-либо одного элемента модели выбора, а за счет некоторой совокупности изменений одновременно ряда ее элементов. Вместе с тем, чтобы попытаться дать какое-либо систематическое описание существующих сегодня моделей, необходимо прежде всего рассмотреть возможные многообразия элементов.

Наиболее характерным для класса задач выбора является наличие представления, под которым всегда понимается непустое множество объектов, представляющих собой альтернативы для выбора. Многообразие задач уже здесь может быть получено различными путями, но наибольшее распространение имеет разделение представлений по степени их полноты и с точки зрения их дискретности (рис. 1.9).

Говоря о такой особенности задач выбора, как непрерывность представления, необходимо прежде всего отметить, что вопрос непрерывности представления непосредственно связан с проблемой континуализации задач выбора, под которой понимается процесс приведения дискретных задач к непрерывному виду. Из всех дискретных моделей всегда можно выделить так называемые модели с несущественной дискретностью, т. е. такие, дискретность в откликах которых не превышает заданный шаг

квантования в реализующем алгоритме ЦЭВМ. Такие модели без каких-либо дополнительных ограничений можно считать непрерывными. Влияние их на формирование представления будет отличаться от действия непрерывных моделей лишь тем, что представление, образованное в результате работы моделей с несущественной дискретностью, всегда конечно и счетно. Этими свойствами непрерывные представления не обладают.

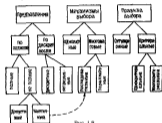


Рис. 1.9

Особое место в задачах выбора занимают модели, обладающие существенной дискретностью. В отличие от первого случая отклики таких моделей уже не могут интерпретироваться как непрерывные величины. Эти модели формируют наиболее распространенный вид представлений, т. е. таких, которые определяются как конечное число альтернатив. Обычно при этом оговаривается, что не должно быть менее двух альтернатив. Однако это совсем не обязательно. Выбор может быть произведен и на представлении, состоящем всего из одного элемента, т. е. он может быть или выбран, или не выбран. Принципиально здесь изменится уже механизм выбора — он перестает носить сравнительный характер.

Наиболее существенным отличием задач выбора, построенных на дискретных и непрерывных представлениях, является то,

что вся совокупность альтернатив непрерывного предъявления допускает интерпретацию некоторой непрерывной функцией и тем самым обеспечивает в этих задачах возможность применения дифференциального исчисления. Так были созданы аналитические и численные методы оптимизации (методы математического программирования), использующие понятия первых и вторых производных функций, методы оптимального управления и некоторые другие. В свою очередь, дискретное предъявление позволяет вообще не иметь модели синтеза системы, или, как иногда говорят, ее математического описания. Альтернативы предъявления в этом случае могут формироваться путем выполнения проектных проработок, состоять из ряда характеристик существующих объектов или же вообще представлять собой множество производных векторов. Разумеется, отказ от наиболее мощного инструмента функционального анализа, основу которого составляет понятие непрерывной функции, наносит заметный ущерб теоретическим средствам ТПР, ограничивая ее возможности в достижении поставленных целей.

Почти всегда, когда говорят о предъявлении в задаче выбора, имеют в виду, что оно полное, т. е. все возможные альтернативы известны и содержатся в предъявлении. Если же говорить о неполном предъявлении, то можно различать суженные предъявления до так называемых допустимых альтернатив, когда часть элементов предъявления не удовлетворяет каким-либо дополнительным введенным в задачу требованиям, и частичные предъявления, которые образуются в результате выполнения специальных правил метода выбора, не позволяющих рассматривать одновременно все элементы предъявления. Если выделение допустимого предъявления никак не влияет на характер задачи выбора, то при введении в рассмотрение частичного предъявления необходимо сразу оговорить и механизм выбора, определяющий последовательность действий с этими предъявлениями. Как уже отмечалось, под механизмом выбора мы понимаем пару  $M = \langle \sigma, \rho \rangle$ , где  $\sigma$  — структура на множестве вариантов  $X'$  предъявления  $[X']$ , а  $\rho$  — правило выбора, указывающее, каким образом из предъявления  $[X']$  на основе структуры  $\sigma$  выделяется

множество  $(X')$  выбираемых вариантов. В том случае, когда механизмом предъявляет однозначный выбор, т. е. такой, в процессе реализации которого предъявление остается неизменным, в результате исполнения предъявления производительно нового класса задач не образуется. Просто мы продолжим действовать так же, как если бы предъявление было полным. Здесь можно говорить лишь о разности задач выбора, возникающих в условиях неопределенности. С точки зрения построения механизма выбора эти задачи представляют собой принятие решений в условиях риска.

При реализации многошагового последовательного выбора основной становится оценка альтернатив, последовательно поступающих на каждом новом шаге решения задачи. Такая оценка может осуществляться как сравнение между текущей альтернативой и альтернативой, выбранной на предыдущем шаге. Возможно также применение понятия "идеального" образа, и тогда необходимо, чтобы правило выбора учитывало степень близости поступающих альтернатив к этому "идеалу". Но ни первый, ни второй механизмы сами по себе не обеспечивают завершения процедуры. Именно это и становится принципиальным в механизмах последовательного выбора. В качестве одной из наиболее известных задач последовательного выбора является задача о "разборчивой невесте".

Суть этой задачи заключается в следующем. "Разборчивая невеста" находится в помещении, куда последовательно заходят кандидаты в "женихи". При этом невеста может согласиться с представляемым ей кандидатом или отказать ему, но в случае отказа отсреченный кандидат выбывает из списков претендентов и в дальнейшем рассматриваться уже не может. По мере просмотра "женихов" "невеста" накапливает необходимую ей для выбора информацию. Однако чем большему числу "женихов" она отказывает, тем меньше возможностей выбора у нее остается. Очевидно, что существует некоторое количество кандидатов, после отказа которым вероятность успешного решения задачи будет монотонно убывать. Эта величина будет зависеть также от общего числа кандидатов в списке. Поэтому в том случае, если



общее число кандидатов "новесте" неизвестно, решение существенно усложняется.

Наряду с многошаговыми моделями последовательного выбора различают также механизмы параллельного выбора. Они не опираются на понятие полноты предъявления, так как их применение связано со стремлением поднять уровень надежности выбора за счет включения в модель не одного, а нескольких (одного или различных типов) механизмов выбора, и реализуются с их помощью параллельной обработкой элементов предъявления с последующим выделением еще одного механизма — координатора, обеспечивающего единственность решения задачи.

Говоря о возможном многообразии механизмов выбора, кроме уже отмеченного одношагового и многошагового, а также механизмов, построенных на сравнении альтернатив между собой и сравнении их с некоторым априорным эталоном ("идеалом"), необходимо также упомянуть механизмы с неполным сравнением на основе иерархического построения предъявления. Эти механизмы занимают промежуточное положение по отношению к допустимым и частичным предъявлениям. Суть их заключается в том, что сокращение числа просматриваемых альтернатив достигается путем введения дополнительного правила выбора (одноточной функции) и установлении на предъявлении иерархически упорядоченной структуры. При просмотре достаточно высоко расположенных узлов иерархического дерева решений и отбраковке с помощью одноточной функции бесперспективных, на каждом уровне иерархии удается сделать меньше альтернатив, чем входит их в перспективную верхнюю часть предыдущего иерархического уровня. Одним из наиболее известных методов, построенных в рамках описанной модели, является метод ветвей [234].

Помимо необходимости включить в механизм многошаговых моделей дополнительное правило выбора (либо для прекращения решения при последовательном выборе, либо для координации полученных решений при параллельном), еще актуален и многошаговые механизмы принципиально отличаются также тем, что при многошаговых процедурах для получения решения задачи нет необходимости просматривать все альтерни-

тивы предъявления. Эта особенность, обуславливающая неполноту предъявления и многошаговость механизма выбора, оказывает кардинальное влияние на принцип формирования правил выбора. Из этих соображений можно выделить два основных класса правил выбора: критериальные и ситуационные.

При решении практических задач чаще всего мы встречаемся с критериальными правилами выбора. В их основу положена аксиома выбора, с помощью которой устанавливается соответствие (вобщем говоря, подэквивалентное) между качественной и количественной оценками того или иного элемента предъявления. В соответствии с этой аксиомой предполагается существование такой функции, что как только одна альтернатива предъявления становится в некотором смысле предпочтительнее какой-либо другой альтернативы того же предъявления, так сразу же значение этой функции, вычисленное относительно первой альтернативы, становится меньше (или больше) значения функции, вычисленной относительно второй альтернативы. При этом введение в рассмотрение функции получила название критерия оптимальности (целевой функции, функции качества), а механизм, связанный с применением этой аксиомы, механизмом критериального выбора.

Задачи, построенные на основе критериального выбора, получили сегодня самое широкое распространение. Методы их решения составляют основу теории оптимизации и исследований операций, теории оптимального управления и теории игр. Наиболее развитыми в настоящее время являются так называемые однокритериальные задачи, т. е. задачи, в механизмах выбора которых присутствует один критерий оптимальности. Для сложных технических систем, описательной чертой которых является многофункциональность и сложность взаимодействия, неадекватность однокритериального выбора становится особенно заметной и делает результат работы модели неудовлетворительным. Чтобы исправить это положение, в последние годы (примерно с начала 60-х годов) интенсивно разрабатываются механизмы так называемого многокритериального выбора, предусматривающие одновременное рассмотрение не одной, а семейства критериальных функций.

И все же целый класс задач долгое время оставался за рамками средств ТПР. Отличительными чертами этих задач являются большое число параметров, значения которых определяют каждый элемент представления, и наличие в модели объекта целого ряда неформализуемых факторов, относительно которых не удается построить критериальную функцию. Большое число варьируемых переменных определяет большое число элементов представления и делает решение задачи чрезвычайно трудоемким (по отношению к такому роду задачам нередко используются термины "проблемы размерности" и "комбинаторной ширины"). Присутствие же в задаче неформализуемых факторов просто не позволяет их учитывать при реализации критериального выбора. Необходимость получения решения в отведенное время и с учетом пусть неформализуемых, но тем не менее существующих факторов, способствовала появлению механизмов выбора, альтернативных критериальным моделям. Также механизмы получили название механизмов ситуационного выбора.

Как это следует из рассмотренных выше типов представлений и механизмов выбора, ситуационному подходу отвечают частичные представления, реализуемые в многошаговых последовательных механизмах выбора. При этом последовательный характер представления позволяет существенно снизить ее комбинаторную сложность, а введение ситуационного правила выбора дает возможность учитывать любые действующие факторы, в том числе и те, описание которых затруднено.

Рассмотренные модели выбора, по нашему мнению, обладают наибольшей актуальностью в приложениях к обоснованию тактических решений при создании кораблей и судов ВМФ, комплексов корабельного оружия, вооружения и технических средств. К задачам, решаемым в рамках этих моделей прежде всего, следует отнести принятие решений в задачах со множественными критериями. Актуальность многокритериального выбора заключается в двух основных обстоятельствах. Это необходимость проектной интерпретации решений, получаемых при оптимизации достаточно сложных моделей, когда требуется ответить на вопрос: какой из подсистем создаваемого объекта лучше предпочтительнее и почему это произошло? При такой постановке зада-

чи каждой из подсистем ставится в соответствие частные критерии оптимальности, в результате чего возникает многокритериальная задача. Другое обстоятельство, делющее необходимым многокритериальную постановку, выражается в многоцелевом характере создаваемой системы, при котором формализовать цель ее создания принципиально невозможно.

Проблема решения многокритериальной задачи оптимизации заключается в отыскании оптимального в некотором смысле вектора на основе решения частных задач оптимизации. Из проектной интерпретации видно, что такое решение [13] должно минимизировать некоторые промежуточные показатели между точками локальных оптимумов. Все такие решения, конкурентоспособные с точки зрения выбора, образуют область, называемую областью компромиссов, или областью Парето, внутри которой невозможно улучшить одновременно все частных критериев (существует более точное определение области Парето, но оно требует отдельной записи). Таким образом, проблема многокритериальности заключается в выделении всех точек области Парето и нахождении внутри нее некоторой глобально оптимальной точки.

Откакая в стороне проблему построения области Парето в многомерном пространстве переменных (параметрическое представление), решением которой занимается паретовский анализ, сформулируем задачу отыскания оптимального вектора  $\vec{x}$ . Одной из наиболее распространенных процедур выделения области Парето является так называемая линейная свертка частных критериев с неопределенными коэффициентами Карлина С. Из определения этой свертки можно видеть, что для нахождения оптимального вектора  $\vec{x}$  необходимо помимо правила критериального выбора, уже реализованного в виде свертки, иметь еще одно дополнительное условие (условия), связывающее неизвестные коэффициенты. Это условие заключается обычно в виде некоторой процедуры  $G$  и представляет собой меру сравнения неравными значениями частных критериев. С проектной точки зрения решение многокритериальной задачи оптимизации представляет собой компромисс между частными интересами элементов проектируемой системы. Для его разрешения необ-

дима некоторая дополнительная информация, позволяющая раскрыть выражение для сверхки критериев. Поэтому существующие методы решения многокритериальных задач обычно делят по тому подходу, с помощью которого получается эта информация, или, иначе говоря, определяется сравнительная мера частных критериев, количественная мера компромисса. В зависимости от степени формализации процедуры добывания дополнительной информации (как иногда говорят, раскрытия неопределенности системы) методы решения многокритериальных задач делят на эвристические и формальные. Принципиальное отличие этих методов заключается в предположении возможности получения необходимой для решения информации из самой задачи (формальный подход) или только за ее пределами (эвристический подход). При этом основными аргументами в дискуссии о правомерности применения при проектировании технических систем эвристических методов обычно выступают успешность и распространенность этих методов в ряде задач, а также сложность реализации существующих формальных методов. В то же время в качестве основного тезиса сторонники формального подхода выдвигают бездоказательность и противоречивость применения эвристических методов.

С позиций эвристического подхода дополнительная информация добывается за счет интуиции и опыта экспертов. Эта посылка, возможно, имела бы право на жизнь, пусть даже за пределами доказательных рассуждений, если бы в формировании критериев оптимальности проектируемой технической системы не участвовала математическая модель ее описания. Наличие же такой модели исключает вербальное вмешательство в процесс решения. В противном случае теряют доказательность, а следовательно, и научность, все те усилия, которые были приложены при создании этой модели. Выдвинутый тезис имеет вполне доказательную основу [140] и ведет к серьезному и неустраняемому противоречию. Выход из этого положения может быть найден в двух направлениях. Это разделение фаз обоснования решения на формальную и неформальную (в этом случае эвристические процедуры привлекаются после применения всех формальных средств) и переход к решению задачи исключительно

на формальной основе. Можно показать, что с точки зрения использования доказательных средств оба эти направления эквивалентны.

Благодаря настойчивой работе, проводимой в направлении формального подхода, сегодня в распоряжении исследователей имеется целый ряд методов решения многокритериальных задач. Это метод согласованной оптимизации подсистем (В. М. Пашин), принципы максимума функции неопределенности (Р. И. Трухаса), принцип справедливого компромисса (Или), метод паритета (И. Г. Захаров) и др. Вместе с тем сложность этих методов и иногда недостаточная подготовленность пользователей к работе с ними все еще способствуют попыткам привлечения для решения этого класса проектных задач эвристических процедур.

Другим перспективным направлением развития методов обоснования проектных решений является применение правил ситуационного выбора. Принципиальным отличием модели ситуационного выбора от хорошо известного критериального подхода является то, что в качестве элементов представления здесь выступают не альтернативные варианты проектируемой системы, а так называемые конструктивные ситуации, в которых необходимо принимать проектные решения. Иными словами, некоторые проектные решения предлагается формировать как функцию от складывающихся конструктивных ситуаций. Поэтому естественно, механизм ситуационного выбора может носить только многоэтапный характер, а ситуации на входе этого механизма поступают последовательно одна за другой (частичное последовательное предъявление).

Если предположить, что все возможные конструктивные ситуации известны и каждой из них поставлены в соответствие одно и только одно проектное решение, то проблема ситуационного выбора будет заключаться в реализации процедур кодирования и декодирования конструктивных ситуаций. В самом общем случае код конструктивной ситуации представляет собой список количественных или символических переменных конечной длины [5] - элементы которого принимают некоторые допустимые значения, образуя тем самым индивидуальную для

каждой  $L$ -й ситуации. Если такие списки составлены применительно ко всем ситуациям и других ситуаций быть не может, то распознавание сложившейся на момент принятия решения и предъявленной конструктивной ситуации осуществляется путем установления тождества. При этом имеется в виду, что каждой конкурентоспособной альтернативе технического решения поставлена в соответствие некоторая конструктивная ситуация.

В изложенной постановке задача ситуационного выбора представляется достаточно простой. Действительно, трудоемкость ее решения будет определяться только временем реализации процедуры распознавания. Однако и эффективность такой задачи в смысле адекватности принимаемых решений не может быть определена без дополнительного ее расширения по меньшей мере в двух направлениях. Первое из них заключается в необходимости формирования пар "ситуация—решение". Принимая во внимание, что идея ситуационного выбора прежде всего ориентирована на учет неформализуемых факторов, задача построения функции выбора в виде упомянутых пар должна опереться на широкое применение эвристических приемов и подходов. Совокупность таких эвристик применительно к задаче выбора сегодня объединяется под общим названием средств искусственного интеллекта. В этих терминах задача составления пар "ситуация—решение" определяется как задача формирования базы знаний в экспертных системах. Основным элементом этой базы является решающее правило типа "если—то". В наиболее простых случаях наполнение решающих правил содержанием осуществляется с помощью экспертов при разработке экспертной системы. Тогда достоверность принимаемых решений полностью определяется опытом и интуицией экспертов. Адекватность выбора может быть повышена, если предусмотреть механизм самообучения, в соответствии с которым изначально составленная база знаний могла бы изменяться, реагируя на оценки, даваемые принимаемым системой решениям ее пользователем. Для того чтобы такие оценки повышали качество принимаемых решений, необходимо придать экспертной системе "объяснительные" способности. Суть их заключается в возможности получать по запросу пользователя достаточно подробный

комментарий, содержащий мотивировку принимаемых решений. Эта задача носит вспомогательный информационно-технологический характер, но ее существование тем не менее серьезно усложняет решение главной проблемы формирования базы знаний. Другой задачей, также связанной с приданием системе свойств самообучения, является создание механизма наращивания знаний в результате реинтеграции системы на оценки эксперта. В отличие от реализации объяснительных функций эта задача требует серьезного теоретического обеспечения, затрагивающего также вопросы, как непротиворечивость, знаний и сходимость процесса обучения. В настоящее время проблема самообучения и близкая ей проблема самоорганизации систем являются наиболее принципиальными и сложными задачами искусственного интеллекта. Для их решения интенсивно разрабатываются новые теоретические методы, средства информационной технологии и программного обеспечения.

Второе направление развития методов ситуационного выбора также вводит в проблематику задач искусственного интеллекта. Здесь усложнение задачи получается в результате того, что для достаточно сложных конструктивных схем оказывается возможным предусмотреть не все, а только некоторые "стандартные" конструктивные ситуации. После формирования для этих ситуаций функции типа "ситуация—решение" основной становится проблема установления принадлежности, возникающей в виде частичного представления текущей конструктивной ситуации к одной из имеющихся стандартных ситуаций. Эта задача имеет более глубокую историю, чем проблематика искусственного интеллекта вообще, или в частности, направление разработки экспертных систем. С общетеоретической точки зрения она представляет собой задачу поиска близкого аналога, или, иначе говоря, задачу распознавания образов. Здесь возможны различные подходы. Наиболее известны и хорошо формализуемым является применение алгебры Заде, использующей понятие функции принадлежности. Результатом действия этого аппарата становится вероятностная оценка принадлежности представляемой ситуации к любой ситуации  $x$  из имеющегося стандартного набора. Известны также подходы, связанные с

идентификацией образа в терминах рецепторных матриц или использованием понятия структуры образа. Однако в задачах распознавания достаточно сложных конструктивных ситуаций эти подходы пока успеха не имеют.

В целом, анализируя состояние проблемы ситуационного выбора, следует отметить, что это перспективное направление, находящееся на самой ранней стадии своего становления. Оно, несомненно, составит альтернативу критериальному подходу в тех задачах, где модели включают большое число характеризующих параметров, а для принятия решения необходимо учитывать плохо формализуемые факторы. При этом необходимо подчеркнуть, что те преимущества, которые позволяют реализовать ситуационный подход, всегда будут уравновешиваться одним, но очень серьезным его недостатком — отсутствием доказательности рассуждений. Поэтому к решениям, полученным на основе ситуационного выбора, уже нельзя применять термин "оптимальность", а только лишь "в некотором смысле приемлемое". Там, где основным будет доказательное, строгое обоснование принимаемого решения, очевидно, преимущество будет на стороне механизма критериального выбора.

### 1.5. ПРОБЛЕМА АДЕКВАТНОСТИ СИСТЕМНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

При разработке и последующем применении математических моделей в задачах проектирования почти всегда рассматривается проблема адекватности. Понятие адекватности хорошо интерпретируется при моделировании наблюдаемых, измеримых и повторяемых процессов, протекание которых может быть представлено в виде графиков, полученных в результате обобщения достаточно представительного числа наблюдений. Такая ситуация, как правило, имеет место в естественно-научных задачах, решаемых в рамках тех или иных предметных областей. Значительно сложнее вопрос адекватности модели раскрывается применительно к математическим моделям исследовательского проектирования.

### Особенности моделей исследовательского проектирования

Как и всякая естественно-научная задача, задача проектирования корабля содержит постановочную часть и часть, в которой осуществляется применение математического аппарата теории проектирования. С математической точки зрения постановочная часть представляет собой некоторую неформализуемую субъективную процедуру, обеспечивающую применение формального аппарата. При этом если считать, что все формальные преобразования производятся строго доказательно, то адекватность получаемого решения полностью зависит от успеха в постановке задачи. Учитывая это обстоятельство, при постановке задачи стремятся вводить как можно меньше допущений и предположений, а те, без которых задача все же не может быть решена, стараются привести к интуитивно явному виду или проводить соответствующим обоснованием.

Между этапом постановки задачи и формализованной частью существует диалектическая связь. Недостаточная развитость аппаратных средств ведет к необходимости расширения системы условий при постановке задачи, что в свою очередь негативно сказывается на адекватности получаемых решений. С другой стороны, чем больше проявлений внешнего мира должно быть учтено при создании инженерной системы, тем сложнее подобрать аппарат, достаточно эффективно обеспечивающий решение поставленных задач.

При разработке относительно узкоспециальных систем, функционирование которых предопределяется в нормальных эксплуатационных условиях, соотношение между постановочной частью задачи и частью, обеспечиваемой применяемым аппаратом, примерно такое же, как при описании традиционных измерительных задач. Например, при расчете напряженно-деформированного состояния конструкции постановка задачи включает предположения о начальных и граничных условиях ее закрепления, а также некоторые допущения о последствии конструкции под нагрузкой. При создании измерительного прибора или какого-либо автомата условия, в которых предполагается работа этих систем, также достаточно жестко определены принятыми начальными и граничными условиями. Так, измере-

тешный прибор создается применительно к диапазону измеряемых параметров при практически неизменных условиях внешней среды. Автомат же проектируется на определенные значения входного сигнала, поступающего также при стандартных внешних условиях. Как видно из рассмотренных примеров, существуют целый класс задач, в которых вопросы их постановки решаются на уровне интуиции, практической очевидности и здравого смысла. Входными при этом допущения и предположения порождаются требованиями практики и несовершенством применяемого формального аппарата (например, предположение о неизменности, линейности или, наоборот, виде нелинейности того или иного фрагмента математической модели).

Существуют и другие практические задачи, постановка которых представляет уже значительную сложность и не кажется такой очевидной, как в рассмотренных выше случаях. Однако качественное изменение претерпевает постановка задачи при проектировании таких сложных многофункциональных систем, какими являются современные боевые корабли. Причина, обуславливающая новое состояние постановки задачи, порождается двумя основными особенностями. Первой из них является то, что задача проектирования в значительно меньшей степени формализована, чем какая-либо другая известная нам из курса высшей школы инженерная задача. Это связано как со сложностью самого процесса проектирования, так и с наличием множества различных факторов, влияющих на решение задачи, но не поддающихся формализованному описанию. Таким образом, в задаче проектирования корабля полностью присутствует существенный неформальный аспект. Вторая особенность проектной задачи заключается в неопределенности поведения внешней среды (в первую очередь поведения противника), причем эта неопределенность заключается не только в отсутствии знания о тех или иных входных данных задачи, но и в неоднозначном толковании влияющих на решение и неформализуемых факторов. Никий уровень формализации и высокая степень неопределенности задач исследовательского проектирования формирует одну из основных особенностей математических моделей этой области — значительно более развитую постановочную часть,

что ведет к уменьшению в общем объеме исследований доли аппаратных (дедуктивных, доказательных) средств.

#### Адекватность

Чередко бывает трудно отличить адекватность от таких сходных, но все же иных понятий, как корректность, точность и полезность модели, упоминание которых обычно можно встретить в контексте с понятием адекватности.

В прикладной технической литературе наиболее распространенным является определение корректности (от латинского *correctus* — исправленный, улучшенный), сформулированное в математике. В соответствии с этим определением модель считается корректной, если получаемые с ее помощью решения существуют при любых допустимых исходных данных, единственны для одного и того же набора исходной информации и устойчивы относительно тех или иных возмущающих воздействий. Существование, единственность и устойчивость получаемых с помощью модели решений (результатов) обеспечиваются применяемым математическим аппаратом. В связи с этим следует считать, что приведенное выше определение корректности отражает инструментальный аспект этого важнейшего свойства любой модели.

Само же понятие корректности значительно шире. Оно связано не только с теми возможными несоответствиями моделируемому объекту, процессу или явлению, которые возникают при неверном (некорректном) использовании математического аппарата, но и с неправильным пониманием сути наблюдаемых объектов, процессов или явлений. Иными словами, при моделировании достаточно сложных в понятийном отношении задач, какими являются и задачи исследовательского проектирования, помимо инструментальных условий сохранения корректности всегда существует значимый аспект содержательного прояснения этого свойства. Уже в силу того, что содержательные условия корректности отделены от инструментальных, их выполнение не может опираться на формальные средства и обеспечивается только соблюдением таких законов логики, как закон тождества, противоречия и достаточного основания.

Содержательные условия корректности моделирования приобретают в задаче тем большее значение, чем более развитой оказывается в ней постановочная часть по сравнению с инструментальной. Поэтому, если в традиционных для инженерного дела естественно-научных задачах, постановка которых достаточно узко и четко оговорена, обеспечение корректности достигается преимущественно инструментальными средствами в рамках математического определения этого свойства, то в сложных системных задачах с развитой постановочной частью этого, как правило, оказывается недостаточно и требуется дополнить условия уже на содержательном уровне.

Как из приведенной математического определения, так и из определений известных законов логики можно видеть, что корректность является необходимым, но не достаточным условием успешного моделирования. Прежде чем перейти к рассмотрению достаточных условий, рассмотрим такие понятия, как точность и полнота.

Под точностью моделирования обычно понимается характеристика модели, отражающая степень близости значения моделируемого параметра к его истинному значению. Обратным по отношению к точности является понятие погрешности моделирования.

В приведенном определении наибольшую неясность вызывает термин "близость параметра". При всей простоте этого понятия сформулировать его количественную меру для последующего практического использования оказывается не так легко. Действительно, если мы имеем некоторый наблюдаемый и измеряемый процесс в виде совокупности точек, отвечающих некоторой реализации одного из характеристик для данного процесса параметра, и построили модель этого процесса в виде графика моделируемого параметра, то что следует понимать под "близостью величины моделируемого параметра к его истинному значению"? В качестве количественной меры этой близости может выступать наибольшее из всех расстояний (или разности, ординат) между соответствующими точками графика, сумма квадратов этих расстояний для наперед заданных значений аргумента, разность площадей под графиками натурой (если это

удается получить) и модельной функции. Наконец, часто говорят о качественном совпадении модели и натурой. Это происходит тогда, когда количественного совпадения получить не удается и можно говорить только о повторении формы графика с совпадением его особых точек и выполнением условий на "концах".

Таким образом, несмотря на то, что кажется достаточно легкой притяжательность понятия точности к инструментальным средствам моделирования и скорее всего следует считать его достаточным условием успешного построения модели в инструментальном плане, все-таки остается еще много вопросов, решение которых должно быть перенесено в область неформального моделирования, т. е. в его содержательную часть.

Более общим по отношению к точности является понятие полноты. Если считать, что весь процесс моделирования при исследовательском проектировании носит прагматический характер, т. е. всякая построенная в рамках исследовательского проектирования математическая модель нацелена исключительно на получение содержательного ответа на вполне определенный вопрос, возникающий в терминах проектной проблематики, то полнота модели в полной мере определяется ее качеством. Иначе говоря, в этом случае чем выше качество моделирования, т. е. чем с большим успехом оно выполнено, тем в большей степени можно считать модель полезной.

Известное несоответствие понятий полноты и качества можно найти, наверное, только в фундаментальных исследованиях, когда при постановке задачи и выполнении моделирования до конца остается невыясненной ее научная содержательность и ожидаемые результаты. В этом случае иногда говорят, что исследование проводится в целях удовлетворения научного любопытства исследователя, который сам еще не знает, к чему приведет его усилия.

Можно еще раз повторить, что в области таких прикладных системных исследований, которые проводятся в рамках исследовательского проектирования, описанная ситуация встречается крайне редко. Как правило, актуализация задачи происходит еще на этапе ее постановки, а результат может быть предсказан

но общих проектных соображений. Моделирование здесь используется только для получения количественных соотношений или знакового решения поставленной проблемы.

Таким образом, если понятие корректности носит характер необходимых условий успешного моделирования, то точность и полезность модели создают достаточные условия. При этом точность модели обеспечивает достаточность преимущественно аппаратными средствами, а полезность — на содержательном уровне.

Определив ранее такую характерную особенность, задач исследовательского проектирования, как разноточность постановочной части, можно сейчас сказать, что в основном точность обеспечивает условия достаточности на этапе применения аппаратных средств, в то время как полезность эти же условия обеспечивает на этапе постановки задачи. Отсюда следует вывод о меньшем значении точности в задачах исследовательского проектирования по сравнению с традиционными инженерными задачами.

Среди рассмотренных понятий, позволяющих оценить в том или ином смысле результаты математического моделирования, адекватность занимает особое место. Для того чтобы убедиться в этом, приведем определение этого понятия.

Под адекватностью (от лат. *aebereatus* — приравненный, равный) модели мы понимаем совпадение результатов моделирования и наблюдаемых проявлений объекта или явления. (В языке — соответствующее, верное, точное; в теории познания — верное воспроизведение в мышлении связей и отношений объективного мира.)

Из данного определения можно видеть, что в нем присутствует как элемент корректности (в смысле необходимых условий адекватности), так и аспекты точности (в смысле близости величины моделируемого параметра) и полезности (в смысле совпадения результатов моделирования и наблюдаемых проявлений объекта или явления). Если вспомнить, что точность и полезность обеспечивают достаточные условия успеха моделирования, то становится очевидным, что адекватность и составляет этот успех, применительно к которому тре-

буется выполнение и необходимых, и достаточных условий. Таким образом, корректность представляет собой свойство модели, обеспечивающее необходимые условия ее адекватности, а точность и полезность — достаточные. Причем первое — на инструментальном, а второе — на содержательном уровнях.

Здесь можно отметить, что в соответствии с общей методологией рассуждения такое ключевое выражение в определении точности, как "степень близости величины моделируемого параметра", носит более определенный характер, чем аналогичное в определении адекватности — "совпадение результатов". Это понятие, так как адекватность объединяет в себе помимо точности также более общее понятие полезности модели.

С позиций интересов излагаемого вопроса наиболее характерными элементами приведенного в параграфе 1.2 определения математической модели являются необходимость создания образа оригинала в содержательных (в данном случае, физическая содержательных) терминах и без несущественных особенностей. По существу, именно два этих утверждения и раскрывают методологическую связь между идеей моделирования вообще и содержательностью этого приема познания в виде адекватности моделирования, в частности. Действительно, создание некоторого, пусть даже самого всеобъемлющего, но не отвечающего природе объекта изображения, никак-либо не может продвигнуть исследователя на пути к новому знанию об этом объекте. С другой стороны, только отображение не всех, а части наиболее существенных проявлений объекта (явления) может дать возможность инструментального его изучения. Ведь сам объект (явление) во всех своих проявлениях и так существует в природе, но нас это, по-видимому, не устраивает. Поэтому и используется такой прием, как моделирование.

Таким образом, можно утверждать, что наиболее существенным отличительным признаком приема моделирования является распределение всех наблюдаемых в природе проявлений по степени их значимости в процессе моделирования. При этом, наиболее значимым проявлением ставятся в соответствии наиболее содержательные модельные фрагменты, а стоящие на периферии вообще упускаются из виду как несущественные.



Изложенные выше рассуждения приводят нас к заключению о том, что при математическом моделировании (и моделировании вообще) говорить об адекватности или неадекватности модели моделируемому объекту несправедливо. Любая модель по сути своей должна быть неадекватной наблюдаемому процессу, явлению или объекту. Такой результат методологического исследования без дополнительных комментариев не может, конечно, считаться удовлетворительным. Ведь повсеместно при оценке моделирования в какой-либо задаче мы используем термин "адекватность" именно как меру успеха или неуспеха выполненной работы. Если принять, что ни одна из существующих моделей не может считаться адекватной, то вызывает сомнение целесообразность использования этого понятия вообще. На самом деле это не так. Дело в том, что понятие адекватности как оценки качества моделирования следует применять не к объекту (процессу или явлению), а ни к какому-либо частному аспекту проявления этого объекта, или в целом к той задаче, в рамках которой моделирование осуществляется. При этом, когда речь идет о частных проявлениях объекта моделирования, адекватность обеспечивается в основном за счет точности (в смысле близости наблюдаемого и моделируемого параметров). Тогда же, когда оценивается адекватность модели поставленной на исследование задаче, в этом случае на первый план выступает полнота.

Понятия точности и полноты модели находятся между собой в диалектическом противоречии и одновременно дополняют друг друга. Причем может оказаться, что модель обладает высокой полнотой и очень низкой точностью. Такой, например, является планетарная модель атомного ядра Н. Бора. Геометрический образ, создаваемый этой моделью, не отвечает даже приблизительно тому, что сегодня уже знает наука о микромире. В то же время теория, построенная Бором на основе этой модели, позволила обнаружить, как известно, ряд новых фундаментальных результатов. С другой стороны, как бы ни была точна модель, если это свойство не порождает полезности, адекватной поставленной задаче ее назвать нельзя.

Таким образом, методологическая проблема адекватности при исследовательском проектировании кораблей представляет собой установление меры между инструментальными (точность) и содержательными (полнота) аспектами адекватности в условиях разнотипной постановочной части задачи и, соответственно, меньших возможностей по использованию аппаратных средств.

#### Адекватность моделей исследовательского проектирования кораблей

Среди функциональных системных моделей исследовательского проектирования кораблей следует выделить два важных класса моделей. Это модели анализа (прямая задача проектирования) и модели синтеза (обратная задача).

Модели анализа наиболее широко распространены в инженерных задачах. Сфера их построения отражает процесс исследования объекта или явления, начиная от наблюдения, выделения характерных особенностей, разработки способов их измерения и до выведения обобщающего закона (закономерности). Для реализации этой сферы нужен как минимум сам объект (процесс, явление) для исследования. Если такой объект существует, а в проектировании в качестве него может выступать проект корабля, выполненный в той или иной степени подробности, то математическая модель явления будет представлять функцию, аргументами которой станут измеримые и наблюдаемые параметры проекта, а сама функция будет в некотором направлении заданном смысле количественно оценивать качество этого проекта.

Основу аппаратных средств моделей анализа составляет теория подобия и математическая статистика. При этом функциональное насыщение моделей осуществляется на базе всей совокупности знаний, которыми располагает современная кораблестроительная наука.

В теории размерности и подобия устанавливаются условия, которые должны соблюдаться в опытах с моделями, и выделяются характерные и удобные параметры, определяющие основные эффекты и режимы процессов. При этом особенностью задачи проектирования является невозможность в большинстве

случаев строгого соблюдения критерия подобия. Поэтому более широко в задачах исследовательского проектирования используется прием аналогии, который обеспечивает значительно более низкий уровень точности, чем при сохранении условий подобия.

Теория и методы математической статистики, опирающиеся на массовые явления и отражающие влияние рассеивающих случайных факторов, без дополнительных оговорок также не могут применяться в исследовательском проектировании. Эти методы предусматривают допущения об устойчивости параметров распределения и наличии вероятностных законов рассеивания случайных величин. В теории же исследовательского проектирования, как правило, мы имеем дело с предельно малыми выборками случайных величин, на которые распространяются самые простые закономерности теории вероятностей и применительно к которым могут быть получены характеристики не старшие вторых моментов.

Низкая точность задач анализа в исследовательском проектировании связана не только с особенностью исходных данных и невозможностью выполнения законов подобия. Одной из основных причин, определяющих низкую точность моделей анализа в исследовательском проектировании, является также проблема расширения моделей (п. 1.3 и 5.3).

Таким образом, целый ряд особенностей задач анализа при проектировании кораблей заставляет говорить о значительном снижении точности этих моделей по сравнению с моделями предметной области. Понимание этого факта, с одной стороны, требует обращать значительно больше внимания на возможность разработываемых моделей. С другой же стороны, это обстоятельство всегда является наивысшим для разработку модели о том, что получить в модели исследовательского проектирования точность, сравнимую с той, которую обычно можно встретить в традиционных инженерных задачах, теоретически невозможно.

Значительно сложнее по сравнению с задачами анализа вопрос адекватности модели раскрывается применительно к математическим моделям синтеза.

Задачи синтеза выполняются исключительно в целях проектирования. По своей методологической сущности они представ-

ляют противные модели, позволяющие предполагать с той или иной степенью достоверности облик проектируемого корабля, отвечающего некоторым наперед заданным свойствам. Здесь в качестве аргументов модельной функции выступает формализованная информация о свойствах, и составление получаемых модельных функций и ее аргументов дают необходимое количество информации для получения облика проектируемого корабля.

Особенности построения математических моделей синтеза корабля составляют самостоятельный раздел теории проектирования. Здесь же необходимо только отметить, что поскольку в результате работы модели синтеза появляется образ нового корабля, в отличие от модели анализа, на основе которой мы получаем информацию о существующем корабле, понятие адекватности модели синтеза также существенно изменяется по сравнению с тем, которое было нами сформулировано применительно к моделям анализа.

Прежде всего это отличие проявляется в отношении к самому объекту моделирования. Действительно, если в задачах анализа объектом моделирования является корабль, который существует и проявляется в виде некоторой совокупности свойств и признаков, то в задаче синтеза такого объекта не существует. Его еще предстоит создать как результата решения задачи. Определяя инструментальные аспекты адекватности модели, мы задаемся вопросом о том, насколько близко оказывается значение моделируемого параметра к его истинному значению. При этом мы неожиданно обнаруживаем, что "истинных" значений параметра и не существует в природе.

В то же время модели синтеза, как и все другие модели исследовательского проектирования, должны создавать образ моделируемого объекта в фактически содержательных терминах. Эта цель достигается обычно для большинства достаточно сложных моделей синтеза методологическим приемом (прямой синтез, в отличие от прямого синтеза такого, например, как аналитическое решение системы уравнений), состояющим в том, что синтезирующая процедура реализуется путем многократного решения задач анализа. В этом случае каждая из возникающих в

модель синтеза задач анализа может быть оценена с точки зрения точности.

Очевидно, что такое оценивание может быть использовано только для косвенной характеристики точности модели. Для более полной оценки точности используется еще один прием, состоящий в разделении процесса синтеза на два основных этапа, каждому из которых соответствует свой подкласс моделей: модели направленного и ненаправленного синтеза (см. п. 1.2).

Как уже говорилось в параграфе 1.2, модели задач ненаправленного синтеза, как и все модели анализа, в основном строятся на законах подобия (в общем случае аналогии). Поэтому точность синтетических моделей, обеспечиваемая физической содержательностью модельных фрагментов, распределяется преимущественно в моделях направленного синтеза.

Модели направленного синтеза используют информацию о функциональных проявлениях корабля (например, боевой эффективности) и тех затратах, которые предстоит понести при его создании. При этом в большинстве случаев процесс направленного синтеза так же, как и в случае ненаправленного синтеза, осуществляется путем многократного решения задач анализа упомянутых функциональных проявлений корабля. Полученное множество решений задач анализа используется затем в применяемом в данной модели синтеза механизме выбора. Обычно такие механизмы для выбора предпочтительного варианта используют некоторые процедуры упорядочения, поэтому и модели этого типа получили название моделей направленного синтеза.

Модели направленного синтеза уже не удается связать сколько-нибудь удовлетворительно с естественно-научной основой предметных областей. Это наиболее искусственная (синтетическая) часть общей задачи синтеза. Здесь ответственность за адекватность моделирования в полной мере ложится на ее содержательные аспекты, т. е. на полезность применяемой модели. Поскольку, как уже отмечалось, направленный синтез происходит на основе применения теории принятия решений (механизма выбора), то полезность модели следует формулировать в терминах именно этой теории.

Адекватность применения аппаратных средств теории принятия решений определяется возможностью надежно отделять рекомендуемый к выбору вариант от любого другого варианта преувеличения. Иначе говоря, модель принятия решений будет считаться точной (адекватной), если все те возможные ошибки на содержательном или функциональном уровнях, которые могут в ней образоваться в результате неточной работы составляющих ее модельных фрагментов, не приведут к изменению решения по сравнению с тем, которое могло бы быть принято на абсолютно точной модели. Для того чтобы оценить данное только что определение точности модели принятия решений от общепринятого, используются термины "с точностью до альтернативы" ( по аналогии с "точностью до заданного знака после запятой"). Поскольку иной цели кроме надежного выбора в задаче принятия решений не преследуется, то очевидно, что в данном случае понятие точности модели полностью совпадает с понятием ее полезности.

Нахождение оптимального распределения информации в математической модели представляет собой самостоятельную системную задачу, требующую для своего разрешения специальных теоретических средств. Эти средства должны предоставлять возможность балансировать фрагменты системной модели по глубине их проработки, адекватности и потребности в исходной информации, участвовать в решении задачи определения рационального состава элементов системы, обеспечивать согласование внутрисистемных связей и позволять осуществлять эффективное выделение системы из окружающей среды. Разработка этих средств еще только начинается и направлена на создание гибких с точки зрения возможности проблемного перестроения моделей систем автоматизированных исследований.

## Глава 2. МЕТОДЫ ТЕОРИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НАВДОННЫХ КОРАБЛЕЙ

### 2.1. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ПОДБОРА И РАЗМЕРНОСТИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ

При создании нового корабля целесообразно в возможно большей степени использовать опыт проектирования, строи-

гельская и жемчужина ранее созданных кораблей. Корабль, который по своим тактико-техническим элементам и конструкции в наибольшей степени соответствует характеристикам вновь проектируемого корабля, принимается в качестве прототипа. На практике часто не представляется возможным определить прототип, который полностью отвечал бы этому понятию. Тогда элементы нового корабля могут быть получены с помощью измененного прототипа путем внесения в его элементы закономерных изменений. Пересчет в этом случае практически осуществляется путем независимого изменения масштаба прототипа по длине, ширине, высоте и т. д., т. е. путем изменения расстояний между шпангоутами, внутренними и баковыми.

Характерными являются также случаи, когда соответствующие элементы проектируемого корабля и прототипа наблюдаются только применительно к отдельным свойствам корабля или же его подсистемам, конструктивным узлам.

Принято говорить, что в первом случае используется основной, а во втором — частный прототипы.

Правомерность использования тех или иных характеристик прототипа при разработке проекта нового корабля определяется подобием прототипа и проекта. Установление факта подобия двух объектов (или свойств) осуществляется в рамках теории подобия (размерности), основу которой составляет закон подобия.

Закон подобия был впервые применен Ньютоном (1643 - 1727) при изучении поведения системы, подобной другой системе и работающей в условиях гомогенного закона действующих сил или закона, выраженного функциональной зависимостью. К общему случаю подобия следует отнести обобщенное подобие, которое можно охарактеризовать следующим понятием: если по элементам и поведению одной системы материальных или геометрических точек можно определить элементы и поведение другой системы, то такие системы можно назвать обобщенно подобными.

Закономерности обобщенного подобия, когда две подобные системы находятся в условиях различных ускорений, температур и электромагнитных воздействий, были установлены академиком

В. М. Кирпичевым и Н. А. Миховым в их работе "Моделирование тепловых устройств" (1936).

Рассмотрим кратко основные положения теории подобия и размерностей. Всякая физическая величина может количественно сравниваться только с величинами, имеющими ту же физическую природу, что определяется их размерностью. Величины, имеющие разные размерности, соответственно несоизмеримы.

Отношение физической величины к другой, ей подобной, т. е. имеющей ту же размерность, является безразмерным числом. Безразмерные величины в практике, в том числе и кораблестроительной, широко применяются для сравнения объектов, определения многих характеристик различных объектов. Безразмерные величины являются инвариантными, т. е. независимыми от выбора той или иной системы единиц измерения.

Все единицы измерения, относящиеся к какому-либо объекту, делятся на основные и производные. Например, движение объекта может быть описано параметрами: пройденный путь  $S$ , время  $t$ , скорость  $v$  и ускорение  $g$ . Если принять, что основной единицей измерения длины будет метр (м), времени — секунда (с), то скорость будет иметь производную размерность м/с, а ускорение м/с<sup>2</sup>.

Математическое выражение производной единицы измерения через основные единицы измерения называется формулой размерности. Она представляет собой степенной одночлен вида

$$\varphi = \alpha^x \beta^y \gamma^z \quad (2.1)$$

где  $\alpha, \beta, \gamma$  — основные единицы измерения;  $x, y, z$  — показатели степени при основных единицах измерения.

Среди единиц измерения объекта выделяются независимые размерности, формулы которых не могут быть получены в виде степенного одночлена из других размерностей того же объекта. Независимыми являются прежде всего основные единицы измерения, но, если в задаче не все основные единицы измерения встречаются в чистом виде, то независимыми могут оказаться и некоторые производные размерности, при этом число независимых единиц измерения не может превышать число основных единиц измерения.

Произведение любых размерностей (как основных, так и производных) можно рассматривать в качестве новой производной единицы измерения. В некоторых случаях путем соответствующего комбинирования множителей можно получить безразмерные произведения. Например, при любых единичных измерениях времени  $t$ , длины  $l$  и ускорения  $g$  величина выражения  $g^2 l$  будет безразмерной. Величина подобных безразмерных комбинаций не зависит от масштаба исследуемого явления. На этом строится теория моделирования, которая дает возможность предвидеть свойства объектов весьма различных размеров по данным испытаний одного из них. Анализ безразмерных комбинаций позволяет просто и уверенно определять элементы нового корабля по его моделям или прототипу.

Анализ размерностей позволяет определить и вид условий подобия исследуемых объектов на основе структуры формул размерности характерных параметров. В основе анализа размерностей лежит так называемая  $\pi$ -теорема, доказанная Букенгемом. В соответствии с этой теорией выражение вида

$$\Phi(a_1, a_2, \dots, a_n) = 0, \quad (2.2)$$

где  $a_1, a_2, \dots, a_n$  — все размерные и безразмерные величины, участвующие в формировании функции (2.1), описывающей некоторое физическое явление, может быть приведено к виду

$$F(\Pi_{1,1}, \Pi_{1,2}, \dots, \Pi_{1,k}) = 0, \quad (2.3)$$

где  $n$  — общее число размерных и безразмерных параметров в выражении (2.1);  $k$  — число независимых единиц измерения размерных величин из (2.1). Тогда  $n - k$  — число построенных безразмерных комплексов.

Итак, в соответствии с  $\pi$ -теоремой из  $n$  независимых параметров при  $k$  независимых размерностях может быть образовано не более  $n - k$  независимых безразмерных комбинаций.

Безразмерные комбинации могут преобразовываться в новые безразмерные комбинации путем возведения в степень, умножения и деления. Возможность преобразования полученных безразмерных комбинаций позволяет в любой задаче применять

удобный их вид, а также расширяет выбор тех или иных основных единиц измерения.

Теория подобия является прямым следствием теории размерности. Все явления, характеризующиеся одинаковыми значениями безразмерных комбинаций из определяющих их размерных параметров, называются подобными, а безразмерных комбинации, характеризующие их — критериями подобия.  $\pi$ -теорема является основной теоремой теории подобия, устанавливающей условия подобия объектов, т. е. условия равенства критериев подобия.

Теория подобия изучает законы образования безразмерных комбинаций, но не позволяет устанавливать зависимости между ними. По этой причине исчерпывающее решение может быть получено только в таких задачах, в которых число размерных параметров превосходит число независимых размерностей не более, чем на единицу. Только при этом условии возможен единственный критерий подобия, величина которого может быть установлена опытом или расчетом и останется неизменной для всех возможных вариаций всех параметров.

Для механических систем, к которым относятся проектируемый корабль, установлено понятие геометрического, кинематического и динамического подобия.

При геометрическом подобии отношение соответствующих линейных размеров будут одинаки и тем же и равно линейному масштабу  $c_l$ :

$$\frac{L}{L_0} = c_l. \quad (2.4)$$

Любая геометрическая характеристика создаваемой системы может быть определена по соответствующей характеристике существующей системы с учетом масштаба  $c_l$ :

$$\text{линейная величина} \quad L = c_l L_0; \quad (2.5)$$

$$\text{площадь поверхности} \quad S = c_l^2 S_0; \quad (2.6)$$

$$\text{объем} \quad V = c_l^3 V_0; \quad (2.7)$$

$$\text{статический момент площади} \quad W = c_1^3 W_0; \quad (2.8)$$

$$\text{момент инерции площади} \quad J = c_1^4 J_0; \quad (2.9)$$

$$\text{кривизна} \quad \frac{1}{r} = \frac{1}{c_1 r_0} \quad (2.10)$$

и т. д.

При кинематическом подобии помимо пропорциональности линейных величин для систем должна иметь место пропорциональность течения времени в системах, поэтому вводится дополнительно временной масштаб  $c_t$ :

$$c_t = \frac{T}{T_0}. \quad (2.11)$$

Производные величины могут быть выражены через основные следующими соотношениями:

$$\text{линейные скорости} \quad v = \frac{c_l}{c_t} v_0; \quad (2.12)$$

$$\text{линейные ускорения} \quad a = \frac{c_l}{c_t^2} a_0; \quad (2.13)$$

$$\text{угловые скорости} \quad \omega = \frac{1}{c_t} \omega_0; \quad (2.14)$$

$$\text{угловые ускорения} \quad \dot{\omega} = \frac{1}{c_t^2} \dot{\omega}_0 \quad (2.15)$$

и т. д.

При динамическом подобии помимо пропорциональности линейных величин и времени течения процессов в различных системах должна иметь место пропорциональность масс соответствующих тел в системах, т. е. вводится дополнительно масштаб для пересчета масс  $c_m$ :

$$c_m = \frac{M}{M_0}. \quad (2.16)$$

Производные динамические характеристики могут быть выражены следующим образом:

$$\text{масса} \quad m = c_m m_0; \quad (2.17)$$

$$\text{плотность} \quad \rho = \frac{c_m}{c_l^3} \rho_0; \quad (2.18)$$

$$\text{количество движения} \quad Q = \frac{c_l c_m}{c_t} Q_0; \quad (2.19)$$

$$\text{момент инерции массы} \quad J_m = c_l^2 c_m J_{m0}; \quad (2.20)$$

$$\text{момент количества движения} \quad J_m = \frac{c_l^2 c_m}{c_t} J_{m0}; \quad (2.21)$$

$$\text{сила} \quad F = \frac{c_l c_m}{c_t^2} F_0; \quad (2.22)$$

$$\text{давление} \quad P = \frac{c_m}{c_l c_t^2} P_0; \quad (2.23)$$

$$\text{энергия} \quad E = \frac{c_l^2 c_m}{c_t^3} E_0; \quad (2.24)$$

$$\text{мощность} \quad N = \frac{c_l^2 c_m}{c_t^3} N_0 \quad (2.25)$$

и т. д.

Непрямойм условием пересчета характеристик по приведенным выше зависимостям является выполнение условия подобия. Рассмотрим для примера задачу изучения силы сопротивления движению корабля  $R$  с учетом волнообразования по данным модельных испытаний. При этом учитываются такие характерные параметры, как длина корабля  $L$ , скорости движения корабля  $v$ , плотность воды  $\rho$ , ускорение силы тяжести  $g$ . Число независимых параметров равно 5, а число независимых критериев подобия при трех независимых размерностях длины, времени, массы будет равно двум:

$$\text{коэффициент сопротивления} \quad \zeta = \frac{R}{\rho v^2 L^2}; \quad (2.26)$$

$$\text{критерий Фруда} \quad Fr^2 = \frac{v^2}{g L}. \quad (2.27)$$

Для возможности пересчета силы сопротивления движению по результатам испытанной модели прежде всего должны быть выполнены условия геометрического подобия  $c_1 = L / L_m$  при изготовлении модели. Если модель испытывается в условиях Земли в воде с одинаковой плотностью, то ускорение свободного падения и плотность в модельных и натуральных условиях одинаковы. Тогда масштаб масс составит

$$c_m = \frac{D_k}{D_m} = \frac{\rho V}{\rho V_m} = \frac{\rho R L B T}{\rho g L_m R_m T_m} = c_1^3. \quad (2.28)$$

Необходимость удовлетворения условию равенства чисел Фруда в модельных и натуральных условиях позволяет определить масштаб пересчета скоростей:

$$c_1^2 = \frac{R^2}{g L_m} c_1. \quad (2.29)$$

Выполнение условия динамического подобия, т. е. равенства коэффициентов сопротивления движению корабля и модели позволяет произвести пересчет силы сопротивления с модели на натуру в соответствии с масштабам пересчета:

$$\frac{R}{R_m} = \frac{\rho v^2 L^2}{\rho v_m^2 L_m^2} = c_1^2 c_1^2 = c_1^4. \quad (2.30)$$

Таким образом, выбор геометрического масштаба однозначно определяет кинематические и динамические характеристики корабля по результатам испытания модели.

Для учета сил трения требуется ввести в рассмотрение вязкостную характеристику вязкости жидкости, например коэффициент кинематической вязкости, имеющий размерность  $[L^2 T^{-1}]$ . При этом появится дополнительная независимая безразмерная

величина — число Рейнольдса  $Re = v L / \nu$ . Дополнительное условие подобия  $Re = Re_m$  с учетом  $\nu = \nu_m$  приведет к необходимости выбора масштаба скорости

$$c_1 = \frac{L v_m}{L_m v} = c_1^2. \quad (2.31)$$

Это не может быть выполнено одновременно с полученным ранее  $c_1^2 = c_1$ .

Выявленное противоречие устраняется выбором условий эксперимента. При моделировании составляющей силы волнового сопротивления вязкостью жидкости пренебрегают и выбор масштаба скорости определяется числом  $Fr$ . При моделировании составляющих, обусловленных вязкостью, принимают меры к исключению возникновения и масштаб скорости определяют по критерию  $Re$ .

Геометрическое подобие, при котором масштабы преобразования по декартовым прямоугольным координатам выбираются независимо друг от друга, называется трансформированным, деформированным или частичным подобием. Оно широко используется при проектировании кораблей, так как позволяет пересчитывать многие характеристики по известным характеристикам прототипа при изменении соотношений главных размеров.

Линейные размеры проектируемого корабля и прототипа связаны соотношениями:

$$x = l x_1, \quad y = h y_1, \quad z = t z_1. \quad (2.32)$$

где  $x, y, z$  — линейные размеры по длине, ширине, высоте соответственно;  $l, h, t$  — масштабы преобразования линейных размеров. Выбор этих масштабов определяет трансформацию главных размеров проектируемого корабля по отношению к прототипу:

$$L = l L_1, \quad B = h B_1, \quad H = t H_1.$$

Научные исследования, связанные с проектированием корабля предполагают проведение и анализ экспериментов, опытов, операций, явлений многократно повторяющихся в определенных условиях. Даже при относительной стабильности опытных условий результаты измерений всегда имеют некоторое рассеивание, которое принято называть случайным рассеиванием или случайной ошибкой. Изучением закономерностей подобных процессов занимается достаточно обширная область науки — математическая статистика, разрабатывающая рациональные приемы обработки опытных данных, относящихся к таким явлениям и отражающих влияние рассеивающих случайных факторов. Эти приемы называются математико-статистическими методами.

Структурно-математическая статистика предусматривает деление на четыре раздела. Первый раздел — описательная статистика — занимается описанием картины случайного рассеивания по данным наблюдения и анализа изучаемых массовых явлений. Описательная статистика обеспечивает минимум материалов, достаточных для выявления закона распределения для каждого случая.

Вторым наиболее развитым разделом математической статистики является раздел оценки параметров законов распределения. На практике во многих случаях функция распределения рассматриваемой случайной величины  $\xi$  неизвестна, ее определяют по результатам наблюдений или, как говорят, по выборке.

Выборкой объема  $n$  для данной случайной величины  $\xi$  называется набор  $x_1, x_2, \dots, x_n$  независимых наблюдений этой величины. Говорят, что выборка взята из генеральной совокупности величины  $\xi$ .

В отличие от теоретической функции распределения  $F(x)$  путем обработки результатов наблюдений строятся эмпирическая функция распределения случайной величины  $\xi$  —  $F_n^*(x)$ .

Согласно закону больших чисел Бернулли  $F_n^*(x) \rightarrow F(x)$ , т. е.

эти функции сходятся по вероятности.

Чем больше объем выборки, тем более точное представление дает эмпирическая функция распределения о теоретической функции распределения. Однако приведенный способ нахождения неизвестной функции распределения на практике оказывается мало приемлем, так как чаще практически невозможно говорить о достаточно представительной выборке тех или иных характеристик проекта корабля. Это происходит не только потому, что не всегда можно найти аналогичные проекты корабля, но также вследствие того, что они создавались в разное время, на различной элементной базе и эксплуатировались в различных условиях.

Во многих случаях бывает заранее известно, что функция распределения  $F(x)$  принадлежит к определенному классу функций, зависящему от одного или нескольких числовых параметров

$$F(x) = F(x, a_1, \dots, a_k). \quad (2.33)$$

В этом случае определение неизвестной функции распределения сводится к оценке неизвестных параметров по выборке.

Оценкой неизвестного параметра называется его приближенное значение, которое можно найти по выборке. Так, оценкой математического ожидания эмпирического распределения (2.33) или его дисперсии может быть выборочное среднее:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k, \quad (2.34)$$

т. е. среднее арифметическое выборочных значений. Выборочная дисперсия будет записываться следующим образом:

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2. \quad (2.35)$$

Существуют различные методы получения оценок. Назовем наиболее распространенные из них.



1. Метод моментов, состоящий в приравнивании теоретических моментов распределения к эмпирическим. Из этих уравнений находят параметры  $\alpha$ .

2. Метод максимума правдоподобия, состоящий в составлении функции правдоподобия, представляющей собой вероятность того, что при  $k$  независимых наблюдениях величинам  $\xi$  будет получена определенная выборка  $x_1, \dots, x_k$ , и получение ее максимального значения, из которого находят неизвестные параметры  $\alpha$ .

3. Использование критериев согласия. Суть метода заключается в минимизации некоторого критерия согласия, получаемого как функцию от разности эмпирического и статистического законов распределения.

Иногда возникает потребность в получении не самих характеристик законов распределения, а некоторых интервалов, гарантирующих нахождение в них этих оценок с практической достоверностью. Определение этих интервалов возможно двумя путями:

- методом Байеса;
- методом доверительных интервалов, предложенных Нейманом.

Третьим разделом математической статистики является раздел статистической проверки гипотез.

Часто функции распределения случайной величины бывают заранее неизвестны и возникает необходимость ее определения по эмпирическим данным. Во многих случаях из некоторых дополнительных соображений могут быть сделаны предположения о виде функции распределения  $F(x)$ . Любое такое предположение называется статистической гипотезой:

$$\{F; \in H\}, \quad (2.36)$$

где  $H$  — множество функций распределения;  $F$  — функция распределения наблюдаемой случайной величины.

Гипотезу обозначают той же буквой, что и множество функций распределения:

$$H = \{F; \in H\}. \quad (2.37)$$

Рассмотрим наиболее характерные примеры статистических гипотез.

1.  $\{F_0(x) = F\}$ , где  $F = F(x)$  — фиксированная функция распределения. Тогда  $H$  — множество из одного элемента  $F$ . Такая статистическая гипотеза называется простой.

2.  $\{F_0(x) \in \{F\left(\frac{x-\alpha}{\sigma}\right)\}, \sigma > 0\}$ , где  $F(x)$  — фиксированная

функция распределения. Гипотеза состоит в том, что распределение наблюдаемой случайной величины принадлежит некоторому фиксированному типу. Например, если  $F(x)$  — нормальная функция распределения, то данная гипотеза состоит в нормальности наблюдаемой случайной величины. Все возможные гипотезы проверяют по эмпирическим данным, т. е. по выборке. При этом методы и критерии, по которым можно было бы судить, согласуются ли наблюдаемые значения величины с гипотезой относительно ее функции распределения, аналогичны методам оценки параметров законов распределения.

Четвертый раздел математической статистики составляет учет о взаимосвязях между величинами, каждая из которых изменяется под действием случайных факторов. Этот раздел называется теорией корреляции. Задача анализа влияния различных факторов на поведение рассматриваемой величины решается в дисперсионном анализе.

Широкое распространение получил регрессионный анализ, использующий различные методы для обработки данных экспериментов и анализа свойств получаемых зависимостей.

Регрессионный анализ — статистический анализ модели, в которой зависимыми переменными являются случайные величины, а независимыми переменными детерминированные величины. Регрессионный анализ тесно связан с корреляционным анализом. Корреляционный анализ устанавливает наличие зависимости, связи между различными входными и выходными переменными модели.

Родоначальником регрессионного анализа принято считать К. Гаусса. Им были заложены основы метода наименьших квадратов, составляющего математическую основу регрессионного анализа. Авторство слова "регрессия" принадлежит английскому

исследователем Гальстоу и первоначально означало "обращение вспять". Однако в современном понимании под регрессией мы понимаем закономерность, восстановленную в результате статистической обработки экспериментов.

В качестве примера применения регрессионного анализа в проектировании рассмотрим следующую задачу.

#### Статистическая обработка данных серии прототипов

Допустим, что различными проектными организациями разработаны несколько вариантов проекта корабля, которые отличаются друг от друга составом и массой вооружения и боезапаса. Остальные элементы, такие, как дальность плавания, скорость хода и тип механической установки, запас топлива и т. п. — одинаковы. В этом случае водонемность разработанных вариантов проекта будут различны не только из-за исходного состава вооружения и боезапаса, но и из-за того, что разработка проектов велась различными проектными организациями. Это определяет необходимость проведения статистического анализа. Используя соответствующие данные разработанных вариантов проекта корабля, можно построить кривую изменения водонемности в зависимости от изменения массы вооружения и боезапаса (рис. 2.1).

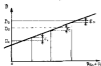


Рис. 2.1

Заметим, что для любой заданной внешней нагрузки встречаются различные водонемности, однако мы можем утверждать, что среднее приближенное водонемность при заданной внешней нагрузке растет с увеличением внешней нагрузки.

Пары случайных величин, таких как пара  $P_0, D$ , имеют двумерное распределение вероятностей некоторого типа. Если установить связь между зависимой случайной величиной водонемности  $D$  и величиной  $P_0(T_0)$ , которая является переменной, но не случайной, то зависимость  $y$

относительно  $x$  называется зависимостью регрессии. Такое уравнение можно получить методом наименьших квадратов.

#### Метод наименьших квадратов

Пусть имеется ряд наблюдений. Предположим, что уравнение регрессии имеет вид

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon. \quad (2.38)$$

Таким образом, для данного значения  $x$  соответствующее значение  $y$  состоит из величины  $\beta_0 + \beta_1 x$ , а также добавки  $\varepsilon$ .

Итак, величины  $\beta_0, \beta_1, \varepsilon$  неизвестны. Идем уравнение прямой. Величина  $\varepsilon$  является отклонением от наблюдения, а  $\beta_0, \beta_1$  являются постоянными. Для получения оценок  $\beta_0$  и  $\beta_1$  параметров  $\beta_0$  и  $\beta_1$  запишем выражение (2.38) в виде

$$j = \beta_0 + \beta_1 x_j. \quad (2.39)$$

где  $j$  — приближенное значение  $y$ .

Учитывая, что имеется  $n$  опытов уравнение (2.38) запишется для каждого из них:

$$j_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i \quad i \in [1, n]. \quad (2.40)$$

Складываем сумму квадратов отклонений от "истинной" линии есть

$$S = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (j_i - \beta_0 - \beta_1 x_i)^2. \quad (2.41)$$

Оценки  $\beta_0$  и  $\beta_1$  подбираются так, чтобы  $S$  минимизировалась. Если взять производные по выражения (2.41) сначала по  $\beta_0$ , затем по  $\beta_1$ , то, приравняв их к нулю (точка минимума), получим систему нормальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} n\beta_0 + \beta_1 \sum_{i=1}^n x_i &= \sum_{i=1}^n j_i \\ \beta_0 \sum_{i=1}^n x_i + \beta_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 &= \sum_{i=1}^n x_i j_i \end{aligned} \right\} \quad (2.42)$$

Отсюда (2.42) относительно  $\beta_0, \beta_1$  получаем

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \left[ \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) \left( \sum_{i=1}^n y_i \right) \right] / n}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 / n} \quad (2.43)$$

Затем относительно  $b_0$

$$b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x}, \quad (2.44)$$

где

$$\bar{y} = \left( \sum_{i=1}^n y_i \right) / n, \quad \bar{x} = \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) / n.$$

Подставляя уравнение (2.44) в (2.39) получаем окончательное уравнение регрессии:

$$\hat{y} = \bar{y} + b_1(x - \bar{x}) \quad (2.45)$$

Зная  $x_i, \bar{y}, \bar{x}$  можно найти остатки  $(y_i - \hat{y}_i)$ . Остатков окажется столько же, сколько было исходных данных. Сумма остатков регрессии всегда равна 0

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_i = 0.$$

Вернемся к нашему примеру. Будем считать, что средние значения всех трех случайных величин  $D_1, D_2, D_3$  лежат на одной прямой линии, которая называется линией средней квадратичной регрессии. С помощью методов математической статистики установить форму кривой практически невозможно. С инженерной точки зрения можно отметить:

1) при  $(P_{01} + P_{02}) = 0, D > 0$ ;

2) с) или  $D (P_{01} + P_{02})$  является монотонно возрастающей.

Этим условиям удовлетворяет множество функций. В условиях отсутствия какой-либо дополнительной информации о виде функции целесообразно выбрать линейное соотношение, т. е. рассмотреть линейную регрессию величины  $D$  на величину  $(P_{01} + P_{02})$ .

Иными словами, найдем функцию  $D = y(x)$ . Величина  $y(x)$  является наилучшим приближением величины  $D$  в смысле

метода наименьших квадратов, если  $M[y - y(x)]^2$  принимает наименьшее возможное значение, при этом величина  $y(x)$  называется средней квадратичной регрессией величины  $y$  на величину  $x$ .

#### Использование прототипа

Если у прототипа масса вооружения и боезапаса равны  $P_{01}^0 + P_{02}^0$ , а водоизмещение —  $D_0$ , то, зная массу вооружения и боезапаса проектируемого корабля, можно приближенно оценить его водоизмещение:

$$D = D_0 \frac{P_{01} + P_{02}}{P_{01}^0 + P_{02}^0}. \quad (2.46)$$

Геометрически это уравнение прямой, проходящей через начало координат. С математической точки зрения это означает, что  $D(0)$  равно 0. Корректировка модели всегда возможна путем центрирования данных, но это не одно и то же, что использование прототипа.

Если записать выражение (2.38) в виде

$$y - \bar{y} = (\beta_0 + \beta_1 \bar{x} - \bar{y}) + \beta_2(x - \bar{x}) + \varepsilon \quad (2.47)$$

или

$$Y = \beta'_0 + \beta_1 X + \varepsilon, \quad (2.48)$$

то

$$Y = y - \bar{y}, \quad \beta'_0 = \beta_0 + \beta_1 \bar{x} - \bar{y}, \quad X = x - \bar{x}.$$

то ошибки для  $\beta'_0$  и  $\beta_1$  в соответствии с (2.43) и (2.44) будут такими:

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (2.49)$$

$$b'_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x} = 0.$$

так как  $\bar{y} - \bar{y} = 0$  при любом значении  $b$ ). Поэтому с полным успехом можно записать центрированную модель, совсем опуская свободный член  $\beta_0$ :

$$y - \bar{y} = \beta_1(x - \bar{x}). \quad (2.50)$$

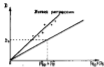


Рис. 2.2

Из рис. 2.2 видно, что величины, получаемые по прототипу и при использовании линии регрессии, могут значительно отличаться. При проектировании обычно подбирается прототип, обеспечивающий, как правило, относительно необходимую ошибку. Чтобы сохранить установленные в результа-

те анализа совокупности однотипных кораблей тенденции и специфические особенности близкого прототипа, обычно линию регрессии проводят через точку, соответствующую координатам прототипа.

Как правило, если линия регрессии проходит через фиксированную точку, ошибки коэффициента регрессии снижаются, т. е. точность зависимостей повышается.

Мы рассмотрели методы построения линейной регрессионной зависимости одной переменной. Аппарат математической статистики позволяет строить и более сложные, степенные регрессии, как одной, так и нескольких переменных. Этот аппарат в настоящее время продолжает развиваться, а задачи, решаемые с его помощью, требуют широкого применения ЭВМ.

Нужно отметить, что при использовании методов математической статистики на проектируемый корабль переносятся как положительные, так и отрицательные особенности используемых прототипов и установленная закономерность, не всегда соответствует оптимальному варианту проектируемого корабля. Поэтому в ряде случаев при определении главных элементов корабля в начальной стадии проектирования лучше использовать прототип. В поисковом исследовании предпочтительнее усредненные показатели, а также эмпирические зависимости,

получаемые в результате обработки серии статистических данных.

### Основные положения теории ошибок

В технике имеют место величины достоверные и случайные.

Достоверные — известные с абсолютной точностью или же с точностью, намного превышающей точность других величин того же порядка.

Случайные (приближенные) — величины, получаемые в результате измерения с определенной точностью, истинное значение которых неизвестно.

Эти случайные величины  $X$  отличаются от достоверного значения величины  $X$  на величину случайной ошибки  $\Delta$ .

$$A = X + \Delta. \quad (2.51)$$

Следует отметить, что случайная ошибка, полученная при определении какой-либо величины, не превосходит некоторой предельной ошибки. Практически при любых измерениях и особенно сложных вычислениях вероятность получения предельной ошибки значительно меньше, чем какой-либо случайной ошибки. Поэтому для суждения о точности расчетов необходимо анализировать не столько величины предельной ошибки результатов, сколько анализ вероятности появления тех или иных случайных ошибок.

Численное определение вероятности появления той или иной ошибки при любом измерении или вычислении является основной задачей теории ошибок.

При достаточном количестве и правильных условиях измерений истинное значение измеряемой величины должно находиться в пределах измеренных ее значений. Зависимость частоты, т. е. вероятности повторения случайных ошибок от их величины, дает закон распределения этих ошибок:

$$\frac{m_i}{n} = P(\Delta_i), \quad (2.52)$$

где  $m_i$  — число повторений ошибок при  $n$  числе общих измерений.

Наиболее характерными законами распределения ошибок являются: равномерное, линейное, нормальное, параболическое.

Как и для всякого другого случайного процесса, наиболее распространенными характеристиками законов распределения ошибок являются:

- математическое ожидание, но в силу заданного симметричного закона распределения оно всегда принимается равным 0
- дисперсия

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2; \quad (2.53)$$

- среднеквадратичная ошибка  $\sqrt{\sigma^2} = \sigma$ .

Отношение любой случайной ошибки к среднеквадратичной ошибке называется *нормированной ошибкой*:

$$Z = \frac{\Delta}{\sigma}.$$

Использование этого выражения позволяет рассмотреть безразмерные законы распределения ошибок. Кроме этого, рассматривают средние ошибки  $\Delta_{cp}$ . Это среднестатистическое из абсолютных значений всех случайных ошибок

$$\Delta_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta_i|.$$

Допустимой ошибкой  $\Delta_0$  является та, которая может быть допущена в расчетах. Возможной ошибкой  $\Delta_p$  — та, вероятность которой достаточно реальна в рассматриваемых условиях.

Признаком практической приемлемости расчетов служат условия

$$\{\Delta_p\} \leq \{\Delta_0\}.$$

Обычно для упрощения исследований определение вероятности появления каждой случайной ошибки может быть заменено определенном вероятности того, что возможная ошибка не

выйдет за допустимые пределы, т. е. определенном достоверности случайной величины.

При этом применяется известный аппарат теории вероятности, в частности понятие доверительного интервала.

Погрешность случайной величины  $\delta$  — это отношение абсолютной ошибки к истинному значению измеряемой величины  $x$ :

$$\delta = \frac{\Delta}{x}.$$

Систематическая ошибка — разность между средним большим числом измерений и истинным значением измеряемой величины, то есть систематической ошибкой называется разность между величиной, произвольно введенной в расчет или гарантируемой в качестве его результата, и математическим ожиданием той же величины.

### 2.3. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ

Одним из важнейших факторов, определяющих боевую эффективность, интенсивность использования кораблей, является их надежность. Проблема обеспечения надежности охватывает весьма широкий круг вопросов, связанных с решением большого количества технических задач от стадии разработки условий и требований ВМФ к надежности корабля и его подсистем до стадии его создания и организации эксплуатации.

Предметом теории надежности как науки являются:

- разработка методологии создания требований к надежности корабля и его подсистем;
- обоснование показателей надежности;
- разработка и развитие методов анализа надежности корабля как сложной системы;
- разработка и развитие методов оценки надежности корабля по надежности его подсистем;
- разработка и совершенствование способов повышения надежности техники;
- разработка и совершенствование методов испытаний на надежность;

— обоснование методов эксплуатации корабля с учетом обеспечения заданного уровня надежности его подсистем.

Согласно ГОСТ В.15.206-84, в котором изложены общие требования к программам обеспечения надежности, понятие надежности определяется как "способность объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования".

Повышение значения надежности кораблей и их подсистем определяется непрерывным ростом сложности современных кораблей. Чем сложнее технический объект, тем он более многофункционален, тем большее значение приобретает обеспечение надежности его функционирования, так как эффективность использования техники будет сведена к нулю, если она будет работать ненадежно. Кроме того, проблема обеспечения надежности тесно связана с аварийностью, обеспечением безопасности эксплуатации и живучести кораблей.

Надежность корабля и его систем должна обеспечиваться соответствующим конструктивным исполнением, уровнем надежности комплектующего оборудования и элементов, резервированием, компоновкой в корабельных условиях, принятой технологией изготовления, проведением испытаний и контроля, техническим обслуживанием и ремонтами.

Надежность — комплексное свойство, включающее в себя частные свойства: безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохранность.

Безотказность — свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность при нормальных условиях эксплуатации в течение определенного времени или до определенной наработки.

Долговечность — свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов.

Ремонтпригодность — свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к предупреждению, обнаружению и устранению отказов и неисправностей путем проведения технического обслуживания и ремонтов.

Сохранность — свойство объекта непрерывно сохранять исправное и работоспособное состояние в течение установленного срока хранения или транспортирования.

С точки зрения надежности объект может иметь различные состояния:

исправное состояние, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технических документов (НТД) или конструкторской документации (КД);

работоспособное состояние, при котором значения его параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствует требованиям НТД и КД;

неработоспособное состояние, при котором значения хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствуют требованиям НТД и КД;

— предельное состояние, при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо либо нецелесообразно, либо восстановление его исправного или работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Переходы из состояния в состояние осуществляются путем наступления следующих событий:

— повреждение — событие, заключающееся в нарушении исправного состояния при сохранении работоспособного состояния;

— отказ — событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния;

— выход из строя — событие, заключающееся в том, что объект перешел в предельное состояние;

— восстановление — событие, заключающееся в переходе объекта из неработоспособного состояния в работоспособное или исправное;

— ремонт — событие, заключающееся в переходе объекта из предельного состояния в работоспособное или исправное.

#### Показатели надежности

Для количественной оценки надежности вводятся так называемые показатели надежности, которые характеризуют сохра-

ность значения эксплуатационных показателей на определенном уровне в заданном интервале времени при установленных условиях применения.

Показатели надежности делятся на единичные (по одному конкретному свойству надежности) и комплексные, которые могут оценивать сразу несколько свойств.

Часто используемым показателем безотказности является вероятность безотказной работы.

Вероятность безотказной работы — вероятность того, что в заданном интервале времени или в пределах заданной наработки не возникнет отказа системы. Вероятность безотказной работы является невозрастающей функцией времени. Она принимает максимальное значение, равное единице при времени работы  $t_0 = 0$ , и стремится к нулю при  $t_0 \rightarrow \infty$ . На практике для характеристики надежности объекта используется статистический подход. Статистическая оценка вероятности безотказной работы определяется зависимостью

$$P(t_0) = 1 - \frac{M(t_0)}{N_0}, \quad (3.54)$$

где  $M$  — число объектов в начале функционирования;  $M(t_0)$  — число отказавших объектов за время  $t_0$ .

Также показателями безотказности являются интенсивность отказов и наработка на отказ.

Интенсивность отказов — вероятность отказа системы в единицу времени после данного момента времени при условии, что до этого момента отказ не произошел. Средняя наработка на отказ или математическое ожидание времени безотказной работы — среднее значение наработки системы между соседними отказами.

Изменение интенсивности отказов во времени имеет при характерных периодах.

Первый период (период "приработки") характерен довольно высокой интенсивностью отказов, которые в большинстве случаев возникают в результате выявления скрытых дефектов, нарушения технологии изготовления, ошибок монтажа.

Второй период нормальной эксплуатации характеризуется проявием постоянной интенсивностью отказов. Обычно это наиболее продолжительный период.

Третий период (период "старения") характеризуется резким увеличением интенсивности отказов за счет массового старения и износа элементов эксплуатируемого объекта. Эксплуатация в этот период связана с большими затратами ресурсов на восстановление объекта.

Основным показателем ремонтпригодности является вероятность восстановления в заданное время — вероятность того, что в течение заданного времени после очередного отказа восстановление объекта будет завершено.

Основными показателями долговечности являются:

- технический ресурс — наработка объекта от начала эксплуатации до достижения предельного состояния, определенного в технической документации;

- срок службы — календарная продолжительность эксплуатации объекта до наступления предельного состояния.

Показателями сохранности являются:

- средний срок сохранности — математическое ожидание срока сохранности;

- эффективность сохранности — отношение числа сохранившихся объектов к их общему числу;

- срок консервации.

К комплексным показателям надежности объектов с учетом их восстановления, ремонтпригодности, безотказности относятся коэффициент готовности, коэффициент технического использования.

Коэффициент готовности — вероятность нахождения объекта в состоянии работоспособности в заданном временном интервале.

Коэффициент технического использования — отношение наработки объекта за некоторый период эксплуатации к сумме значимой наработки, времени простоя, обусловленного техническим обслуживанием, и времени ремонтов за тот же период эксплуатации.

$$K_{\text{на}} = \frac{T}{T + T_{\text{рем}} + T_{\text{рем}}}, \quad (2.55)$$

где  $T$  — парабтка за период эксплуатации;  $T_{\text{рем}}$  — время простоя, обусловленное техническим обслуживанием за период эксплуатации;  $T_{\text{рем}}$  — время ремонта за период эксплуатации.

Особую сложность представляет определение показателя надежности сложных технических систем, под которыми понимаются системы, состоящие из значительного числа взаимосвязанных подсистем и элементов, имеющих несколько уровней функционирования, иерархическую структуру, возможность опущения системы с разной степенью детализации в зависимости от необходимости.

Для сложных технических систем характерными являются стохастичность и непостоянство функций потребности и производительности. По этой причине сложные системы могут характеризоваться множеством возможных состояний, обусловленных разными значениями функций работоспособности, потребности и производительности. В этих условиях понятие отказа сложной системы становится существенно неопределимым.

Корабль является ярким примером сложной системы. При его проектировании очень сложно определить достаточно достоверно показатели надежности корабля в целом, так же, как и многих его подсистем. Кроме того, затруднительно точно определить понятие их работоспособности и отказа.

Часто в качестве наиболее общего критерия надежности корабля рассматривается коэффициент оперативного назначения (КОН), который представляет собой отношение общего времени нахождения корабля в море к продолжительности его эксплуатационного цикла:

$$K_{\text{на}} = \frac{\sum R}{\sum R + \sum T_{\text{вм}} + \sum T_{\text{рем}} + \sum T_{\text{пер}}}, \quad (2.56)$$

где  $\sum R$  — суммарное время нахождения корабля в море за эксплуатационный цикл;  $\sum T_{\text{вм}}$  — суммарное время на боевую подготовку личного состава за эксплуатационный цикл, опреде-

мое директивными документами;  $\sum T_{\text{рем}}$  — суммарное время, затраченное на все виды ремонта корабля;  $\sum T_{\text{пер}}$  — суммарное время нахождения корабля в готовности в базе за эксплуатационный цикл.

Коэффициент  $K_{\text{на}}$  должен характеризовать надежность корабля с учетом принятой системы базирования, технического обслуживания и ремонта, организации использования корабля. Однако с учетом большой общности, сложности  $K_{\text{на}}$  рассмотрение его в качестве достоверного показателя надежности корабля проблематично.

Требования к надежности кораблей и их систем задаются специальными документами системы общих тактико-технических требований к кораблям ВМФ.

В этих требованиях кроме общих положений о понятии надежности, подходах к ее достижению в процессе проектирования изложены конкретные требования к надежности кораблей различных классов и их систем с указанием значений всех нормируемых показателей надежности.

Основным документом, определяющим объем и порядок работ, направленных на обеспечение подтверждения заданных требованиями показателей, является программа обеспечения надежности (ПОН). Она разрабатывается как для корабля в целом, так и для его систем и подсистем.

Процесс обеспечения надежности ПКБ проектианта кораблей выполняется на базе выдаваемых соответствующими организациями ВМФ исходных данных, содержащих назначения и модель использования корабля в процессе эксплуатации, свойства и характеристики корабля, обеспечивающие выполнение стоящих перед кораблем задач, перечень и временные параметры задач, критерии отказа и предельного состояния корабля при заданной модели использования, средства базирования, технического обслуживания и ремонта корабля и корабельных систем.



#### 14. МЕТОДОЛОГИЯ, ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Военное кораблестроение представляет собой обширную область человеческой деятельности, связанную с планированием, проектированием, строительством, эксплуатацией, базированием и утилизацией кораблей и судов Военно-Морского Флота. Создание боевых кораблей требует экономических, производственных и интеллектуальных затрат, сравнимых с теми, которые предусматриваются при реализации наиболее крупных государственных проектов и программ. Это объясняется тем, что каждый боевой корабль является одним из самых сложных инженерных сооружений, которые когда-либо создавались человечеством. При этом стремление обеспечить военному кораблю как можно более высокие боевые качества определяет насыщение его разнообразной и современной техникой, разрабатываемой и изготавливаемой в сотнях научных и проектных организаций и промышленных предприятий.

Учитывая огромную стоимость создания и содержания современного флота, неизменно актуальным становится вопрос о наиболее эффективном использовании выделяемых для этого средств. Поэтому вполне закономерным является тот факт, что создаваемая электронно-вычислительная техника (ЭВТ) и разрабатываемые теории и методы обоснования проектных решений одно из первых приложений получили именно в военном кораблестроении. И более того сами исследования, проводимые в этой области, нередко стимулируют развитие и совершенствование как вычислительных средств, так и теоретических методов исследования.

В последние десятилетия темпы развития ЭВТ и методов ее применения стали настолько высокими, что назрела необходимость осознания и упорядочения процесса их использования как самостоятельного направления деятельности научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций. По мере становления этого процесса сформировались и специфические проблемы, отражающие теоретические, технические, технологические и организационные задачи, выдвигаемые практикой ис-

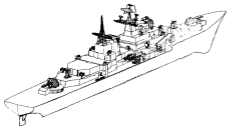
следовательских работ. Уже в начале 70-х годов, когда еще не были решены проблемы совместности программного продукта, производительности и объема памяти ЭВТ не отмечали потребностей практики, а к разработке вычислительных сетей еще не приступали, многим специалистам в области проектирования стало ясно, что дальнейший прогресс в использовании ЭВТ следует связывать с разработкой принципиально новых систем, получивших впоследствии название систем автоматизированного проектирования (САПР).

К настоящему времени разработано значительное число таких систем, в том числе и в нашей стране. Первоначально в качестве основной цели создания систем автоматизированного проектирования (САПР) рассматривалось снижение трудоемкости конструкторского труда, причем исключительно не творческой его составляющей. Вскоре выяснилось, что разработка САПР открывает самые широкие перспективы в направлении освоения безбумажной информатики, обеспечивая непрерывное прохождение конструкторской документации на магнитных носителях от начала разработки до технологических производственных линий. Системы, разрабатываемые в интересах этих двух целей, получили название конструкторских, или технологических. Совершенно иное направление развития автоматизированные системы проектирования получили в результате придания им интеллектуальных возможностей. Первые системы такого типа стали появляться относительно недавно и заняли промежуточное положение между уже ранее созданными САПР и специализированными программными средствами поддержки пользователя, получившими к этому времени широкое распространение. Целью создания этого типа САПР явилось получение новых научных результатов проектного характера, поэтому они часто называются исследовательскими (САИПР).

Актуальность создания систем автоматизированного исследовательского проектирования определяется растущей сложностью проектных задач, требующая для своего решения специальных методологических подходов, теоретических и технологических средств. Последние и находят свое выражение в исследовательских САПР. Внутренне систем автоматизированного ис-

следовательского проектирования (в дальнейшем просто САПР) позволяет повысить качество проектных исследований, ставить и решать задачи, которые вне САПР принципиально не могли бы быть решены.

Особое место САПР занимают в военном кораблестроении. Как уже отмечалось, корабли представляют собой один из самых сложных инженерных сооружений, а по компактности размещения в ограниченном пространстве орудия, вооружения и технических средств не имеют себе равных. Все это порождает целый комплекс проблем, успешно разрешить которые необходимо еще на самых ранних стадиях проектирования перспективных кораблей при проведении широкомасштабных исследований. Для обеспечения выполнения таких исследований предназначены САПР.



Пример организации элементов проектной работы на САПР

За последние годы в организациях ВМФ и промышленности созданы несколько систем, отвечающих концепции исследовательских САПР. Это САПР "Чертеж" в ЦНИИ МО РФ ("Чертеж-1", "Чертеж-2" и "Чертеж-3"), САПР "Проект" ЦНИИ

имени академика А. Н. Крылова ("Проект-1" и "Проект-2"), САПР "Одичка" Военно-морской академии им. Н. Г. Кузнецова. Известны подобные разработки в НИИ и КБ других отраслей промышленности, в частности аэрокосмической А264, некоторых видах.

Из всего комплекса проблем автоматизации проектных исследований можно выделить такие, которые занимают ключевые позиции в данном направлении. Прежде всего это проблема ориентации разрабатываемых систем автоматизированного проектирования на определенную среду пользователей. По сути дела речь идет о том, что успех в создании САПР определяется не только ее техническими достоинствами, но и тем, насколько широко эта система будет распространена среди пользователей и как часто они будут к ней обращаться. Другая проблема, на которой следует остановиться, может быть сформулирована как проблема интеграции знаний, получаемых на основе исследований, выполняемых в предметных областях с целью выработки проектного решения по проекту в целом. Наконец, третья и последняя на проблем, которые здесь будут рассмотрены, это проблема интеллектуализации автоматизированных проектных исследований.

Проблема ориентации разработки исследовательских САПР на среду пользователя имеет несколько значимых аспектов. Известно, что между эффективностью вычислительных средств и необходимым уровнем квалификации пользователя существует диалектическое противоречие, заключающееся в том, что чем больше возможности предоставляет вычислительная система, тем выше входной барьер и больше необходимый объем знаний, которыми должен владеть пользователь, чтобы воспользоваться предоставляемым ему инструментариумом. Недостаточно глубокое понимание этой проблемы нередко приводило к разработке систем автоматизации научных исследований, единственным пользователем которых был сам разработчик. За рубежом по отношению к таким авторам нередко употребляются термины "корнишник", имея в виду, что результатом работы является не полная для какого-то круга пользователей система, а лишь некоторая "корзинка", пригодная только для демонстрации сво-

им кооптам как образчик искусства ее создателя. Решение описанной проблемы реализуется как некоторый баланс между возможным уровнем компьютерной грамотности пользователя и степенью дружелюбности системы. Уровень компьютерной грамотности определяется общим уровнем компьютерного образования в стране, и можно надеяться на его неуклонное повышение, однако вполне определенными темпами, которые и следует учитывать разработчику системы. Кроме того, обязательно следует иметь в виду то обстоятельство, что проксиант-пользователь системы, обременен с системой незначительную часть своего рабочего времени и не может иметь сколько-нибудь высокую профессиональную натренированность. Иначе говоря, одним из основных требований к разрабатываемым САПР является возможность их использования при знании ограниченно-го числа кодовых команд и без каких-либо промежуточных специализированных языков. Наряду с другими подходами к решению этой задачи можно предложить разделение пользователей на ряд уровней, когда пользователям каждого уровня предоставляется инструментарий различной степени дружелюбности. В свою очередь, уровень дружелюбности системы может быть повышен за счет сужения круга возможностей, предоставляемых системой пользователю. Такое сужение становится возможным без ущерба для качества системы, если при ее разработке происходит эффективная специализация системы применительно к задачам исследовательского проектирования. Реализация путей решения первой из отмеченных здесь проблем происходит в рамках нового технологического направления, отличительной чертой которого является ориентация не на широту предоставляемых пользователю возможностей, как это традиционно сложилось в компьютерных технологиях, а на существенное повышение дружелюбности системы за счет сокращения числа предоставляемых пользователю услуг.

Отличительной особенностью систем автоматизированного исследовательского проектирования кораблей является необходимость проведения обоснования проектного решения на основе значительного числа исследований, выполняемых одновременно или параллельно, но в достаточно тесно связанных друг

от друга областях знания. Так, чтобы сделать вывод об оптимальном характерном размере антенного устройства гидроакустического комплекса корабля (ГАК), необходимо помимо моделей определения эффективной дальности действия ГАК и влияния ее на боевую эффективность корабля в задаче борьбы с подводной лодкой привлечь и рассмотреть также модели акустического поля проектируемого корабля, его энергетической установки, поведения корабля на волнении и некоторые другие. Очевидно, что при необходимости организации работ по постановке и решению такой задачи одной из центральных станет проблема интеграции знаний, полученных в предметных областях, позволяющих создавать все перечисленные выше модели. Проблема интеграции знаний также имеет по меньшей мере два аспекта: это создание достаточно распространенного технологически однородного программного продукта (например, в рамках одной научно-исследовательской организации) и разработка механизма коммутации этого продукта. Разумеется, задача создания однородного программного продукта не представляет каких-либо технических сложностей. Речь может идти не более чем о некоторой унификации в рамках одной системы. Однако принимаем решение за ту или иную версию технологической реализации такой задачи, следует помнить, что успех в ее решении будет достигнут только в том случае, если дружелюбность создаваемой единой формы будет выше дружелюбности предоставляемых пользователю стандартных программных средств. В основу проблемы коммутации программного продукта также положено требование дружелюбного интерфейса. Но в этом случае мы неизбежно сталкиваемся с гораздо более сложными инструментальными средствами, и требуется принимать решение либо, о чем уже говорилось выше, вводить в систему понятие пользователей разного уровня (например, программного, т. е. такого, на котором пользователь работает с каким-либо языком высокого уровня, и более низкого уровня, предполагающего только варьирование исходными данными при решении готовых задач), либо в какой-то степени обеспечивать процесс коммутации с помощью интеллектуальных процедур.

Использование при разработке исследовательских САПР интеллектуальных технологий не является данью моде. По сути дела это один из способов разрешения тех проблем, которые не удалось разрешить доказательными средствами. Поэтому решение как последней из рассмотренных проблем — проблемы коммутации программного продукта, разработываемого различными пользователями в различных предметных областях, так и других задач интеллектуализации автоматизированных проектных исследований, о которых будет сказано несколько ниже, является актуальным направлением разработки современных исследовательских САПР и нуждается в дальнейшем развитии.

В общей проблеме создания САПР, прежде всего являющаяся инструментом принятия проектных решений, задача искусственного интеллекта также выступает как своеобразный механизм выбора, поэтому потенциально интеллектуализация может быть подчеркнут любой фрагмент такой системы. Основным отличием механизма выбора на основе подходов искусственного интеллекта (часто этот механизм называют ситуационным) от выбора на критериальной основе, является бездоказательность полученных решений и сложность их анализа. Как правило к задачам ситуационного выбора прибегают тогда, когда серьезные трудности возникают с размерностью задачи (комбинаторная сложность), отсутствует механизм формализации или точность и достоверность получаемых результатов не оказывает принципиального влияния на вырабатываемое решение. Сегодня примером актуальной задачи неразрешимой комбинаторной сложности является задача автоматизированной компоновки общего расположения корабля и формирования его архитектурных решений. Об одной задаче, для которой отсутствует исчерпывающее формальное представление, уже упоминалось, — это коммутация фрагментов сложной системной задачи в единый программный продукт. Примеры же задач, доказательность полученных результатов которых слабо влияет на общее проектное решение, встречаются гораздо чаще и могут быть построены везде, где осуществляется моделирование на иерархических уровнях, значительно отстоящих друг от друга (например, в задачах программного планирования флота и т. п.).

Исходя из описанной проблематики и существующего опыта разработки подобных систем, можно сформулировать следующие основные принципы построения САПР.

В основе создания САПР лежит положение о необходимости рассмотрения ее как системы, основным элементом которой является пользователь, разделившийся на специалистов по системному анализу (проектантов) и специалистов предметных областей, т. е. под САПР прежде всего понимается организационно-техническая система.

Из сформулированного общего положения вытекают более частные принципы технической реализации — технологической однородности и дружелюбности системы.

Принцип технологической однородности предполагает объединение на единой информационной основе всех потенциальных пользователей САПР. При этом речь идет не только и не столько об однородности технических средств, сколько о возможности свободного информационного обмена между специалистами предметных областей и организации процесса накопления в системе интеллектуального потенциала. Таким образом, именно на основе принципа технологической однородности осуществляется переход от разработки разрозненных, во многом повторяющихся друг друга и бесперспективных для применения другими пользователями задач к единой библиотеке доступных, широко коммитированных и легко комитируемых объектов программного продукта. Это позволяет организовать накопление знаний предметных областей в интересах проведения комплексных исследований, направленных на обоснование проектных решений.

Реализация принципа технологической однородности предусматривает разработку социальной системы, позволяющей пользователю, только знакомому с основами алгоритмирования и программирования или эмпирически общающемуся с системой, выполнять достаточно сложные операции над программными элементами. Создание такой системы отражает принцип дружелюбности.

Помимо этих двух принципов ключевым является также принцип модульности. Он состоит в требовании организации

системного и программного обеспечения САПР таким образом, чтобы отдельные задачи предметной области могли бы разрабатываться в виде автономных модулей и независимо одна от другой. При этом от пользователя не должно требоваться знание структуры всей системы или каких-либо смежных задач. Выдвижение принципа модульности связано с путями реализации сформулированных выше принципов технологической однородности и дружелюбности. Этот принцип присутствует в составе основополагающих идей большинства создаваемых в наше время систем автоматизированного проектирования. Как правило он выступает в паре с другим принципом — принципом гибкости.

Принцип гибкости дополняет принцип модульности в плане общей идеи накопления интеллектуального потенциала. Кроме того, он обеспечивает проведение проблемно-ориентированных исследований, основанных на предположении о неравномерном распределении информации в модели — при изменении ориентации проектных исследований, вызываемом актуализацией той или иной проблемы, одни и те же модули могут быть представлены различными версиями, отличающимися степенью разработанности модельных фрагментов. Иногда, подчеркивая важность versionного представления программных модулей, его определяют как самостоятельный принцип versionности.

Рассмотрим структуру и содержание основных блоков САПР. Как правило, исследовательская САПР предполагает существование двойственной структуры (рис. 2.3): консервативной и модулируемой. При этом поскольку консервативная структура представляет собой полное собрание модельных фрагментов и отражает стандартную архитектуру системы, то для описания САПР достаточно рассмотрения только этой структуры. (Модулируемая структура формирует каждый раз заново применительно к проблемному ориентированию конкретного исследования.) В соответствии с методологией системного подхода консервативная структура САПР (в дальнейшем просто структура) разбивается в соответствии с тремя основными принципами декомпозиции: разбиение на уровни, стратификация и эшеломирование.

При разбиении на уровни выделяются два основных уровня декомпозиции: уровень мегамоделей (блок мегамоделей) и совокупность модельных блоков. В блок мегамоделей выделяются

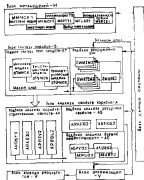


Рис. 2.3

программные модули, содержащие задачи, в которых в качестве системы рассматриваются объекты, включающие корабль на уровне не выше подсистемы (к таким задачам относится определение оптимального состава флота по типам и классам кораблей, т. е. задача таксономии, исследование сочетания этапов жизненного цикла корабля, соединений кораблей или флота в целом, задача комплексной оценки боевой эффективности различных соединений и т. п.). Другие задачи, также включенные в блок мегамоделей, относятся к классу так называемых "быстрых" моделей. Под быстрыми моделями здесь понимаются

также, которые содержат в максимально упрощенном (редуцированном) виде элементы большей части последующих блоков САПР. С вычислительной точки зрения основной особенностью задач блока метамоделей является то, что они выполнены в виде единого программного модуля.

Энцелюирование задач консервативной структуры осуществляется в блоке синтеза корабля. Поскольку в большинстве задач исследовательского проектирования особое внимание уделяется вопросу обоснования состава оружия и вооружения, модели синтеза оружия и вооружения обычно выделяются в отдельный подблок синтеза вооружения. Получаемая в результате работы этого подблока информация поступает в подблок определения главных элементов (проектный подблок) и для последующей оценки — в блок анализа свойств корабля. Методологически блок синтеза предназначен для получения по ограниченному объему входной информации значительного числа выходных характеристик, необходимых для анализа основных свойств корабля. Жесткие ограничения на объем входной информации обусловлены необходимостью ее последующего варьирования в задаче оптимизации. При этом число входных характеристик (варьируемых параметров) определяет размерность задачи. Для получения вояой проектной интерпретации принимаемых решений и приемлемого времени продолжения задачи считается, что размерность варьируемых параметров не должна превышать 7-9. Работа моделей синтеза обеспечивается также поступающей в той или иной степени развитым массивом информации, содержащей результаты обработки прототипов. В целом соотношение между объемом входной и выходной информации блока синтеза позволяет определить этот класс моделей как "расширитель" ("размножитель") информации. Такое расширение достигается за счет использования собственных механизмов выбора и синтезирующих итерационных процедур. Энцелюирование задач синтеза связано с необходимостью в рамках общего синтеза корабля синтезировать также все его материальные составляющие — подсистемы.

Стратифицированное модельное представление наиболее полно реализуется в блоке анализа. Этот блок обычно делится

на три подблока: кораблестроительных (технических) свойств; ресурсных показателей; оценки боевой эффективности. Основной целью такого подблочного деления является упорядочение процесса агрегирования оценок с выходом в результате на формирование критериальной функции (функций). Проблемная ориентация модулируемой структуры здесь достигается простым расширенным составом программных модулей. В информационном плане характерным для блока анализа является "концентрация" информации с целью получения количественных оценок более высокого уровня качества.

Остальные блоки консервативной структуры несут функции управления и обеспечения. Наиболее важным из них является блок оптимизации. В рамках этого блока организуется оптимизационная задача итерационной цикла направленного синтеза (в отличие от задач блока синтеза, где реализуется ненаправленный, иногда говорят — произвольный синтез варианта корабля). Кроме того, здесь же помещаются все процедуры, реализующие механизмы критериального (илиокритериального) выбора.

В данном параграфе рассмотрены только наиболее специфические аспекты методологических, теоретических и технологических основ разработки исследовательских САПР. В то же время целый ряд вопросов, составляющих теоретическую базу проблемы создания САПР, не был здесь освещен. Это прежде всего теория и методы принятия проектных решений, проблемы адекватности математических моделей синтеза и ряд других. Они излагаются в соответствующих разделах учебника.

## Глава 3. ОРГАНИЗАЦИЯ, СТАДИИ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАЗРАБОТКИ ПРОЕКТА КОРАБЛЯ

### 3.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОРАБЛЯ

Военное кораблестроение является одной из самых консервативных областей инженерного творчества. Это связано как с тем, что воюшой корабль, представляя собой наиболее сложное

инженерное сооружение, так и с теми тяжелыми условиями плавания и совместным противолодочным противником, при которых осуществляется его боевое и повседневное применение. Поэтому новый проект корабля содержит значительное количество элементов, заимствованных с уже построенных ранее и прошедших эксплуатационную проверку кораблей. Те же новые конструкторские, технические и технологические решения, которые в постоянно существующей между кораблестроителями разных стран обстановке совершенства настойчиво пытаются внедрять на проектируемых кораблях, перед своей реализацией требует многократной и всесторонней как теоретической, так и экспериментальной проверки. Все это обуславливает большой объем информации, которую необходимо иметь, чтобы приступить к разработке проекта.

Указанная информация содержится в исходных данных и нормативных документах, обеспечивающих проектирование корабля.

К исходным данным обычно относят требования к заданию на проектирование, информацию, отражающую опыт многолетней профессиональной деятельности проектной организации (организаций), а также опыт эксплуатации построенных кораблей, обобщаемый и систематизируемый организационными заданиями. Кроме того, к исходным данным также следует отнести результаты анализа корабельного состава и отдельных проектных решений кораблей ВМС иностранных государств, отечественных проектов, в создании которых данный проектант непосредственного участия не принимал.

Различного рода проектная и справочная материал должны регулярно собираться, изучаться и систематизироваться в соответствующих проектных организациях и научно-исследовательских учреждениях ВМФ. Опыт проектирования, постройки и эксплуатации кораблей данного класса, оформленный в виде справочников, таблиц, чертежей, отчетов и т. д., является, главным образом, первым и важнейшим исходным материалом для разработки нового проекта корабля.

Разработка проекта корабля начинается с изучения задания на проектирование (тактико-техническое задание на проекти-

рование), разрабатываемого 1 ЦНИИ МО РФ и выдаваемого Военно-Морским Флотом с целью глубокого уяснения оперативно-тактического замысла на корабль и выявления основных особенностей, заложенных в основу проекта. Тактико-техническое задание (ТТЗ) разрабатывается на основе оперативно-тактического задания (ОТЗ) и оперативно-тактической модели боевого функционирования корабля. При этом, если ОТЗ формирует исходные данные в основном в области внешних проявлений корабля, то ТТЗ, сохраняя и уточняя данные по оперативно-тактическим возможностям будущего проекта, в большей степени содержит информацию, позволяющую оценить возможность технической реализуемости проекта. Этот документ является основой создания будущего корабля.

Нормативные документы также создаются на основе анализа результатов проектирования и опыта плавания, но в отличие от исходных данных информация, заложенная в нормативные документы, предназначена не только для конкретного проектируемого корабля, а также для группы (класса, типа) кораблей и действует на протяжении значительного отрезка времени. Кроме этого, нормативные документы выполняют также функцию стандартов и являются обязательными для исполнения в процессе разработки проекта.

Одним из основных нормативных документов (системы документов), объединяющих нормы и требования к проектируемому кораблю, является требования к его свойствам: остойчивости, непотопляемости, водкости, мореходности, управляемости, а также требования к архитектуре и прочности корпуса, защите, энергетической установке, системам, устройствам и т. д. До появления этого документа требования к отдельным свойствам корабля каждый раз указывались в заданиях на его проектирование. Это приводило к тому, что характер и объем требований во многом зависел от взглядов, привычек, традиций, практического опыта, теоретической подготовки и других личных качеств отдельных специалистов.

Составление такого рода требований к проектированию корабля осуществляется на основе богатого статистического материала по опыту проектирования, постройки и эксплуатации ко-

рабашь различных классов. Эти требования должны быть научно и практически обоснованы, реально выполнимыми, четко и конкретно сформулированы.

В настоящее время существует единая система так называемых общих технических требований, выделяемых ВМФ к боевым и эксплуатационным свойствам корабля. Система представляет собой ряд согласованных между собой видовых нормативно-технических документов, определяющих на качественном и количественном уровне требования Военно-Морского Флота к создаваемым для него кораблям, оружию, вооружению и техническим средствам. Основным документом этой системы, регламентирующим наиболее общие требования к свойствам надводного корабля, является "Общие тактико-технические требования к надводным кораблям". По мере изменения взглядов на совершенствование вооружения и технических средств требования корректируются и периодически пересматриваются. Система общих технических требований является третьим источником исходной информации, используемой при разработке проектов кораблей.

Тактико-техническое задание на проектирование современного боевого корабля и система общих технических требований к нему преследуют несколько целей. Главная из них состоит в создании образа корабля, настолько точного и определенного, что в результате проектирования расстояние между видением будущего корабля у проектианта и заказчика (ВМФ) было бы минимальным. Другой, не менее важной задачей, на решение которой направлены эти документы, является сохранение единообразия в технических решениях применительно ко всем кораблям флота. Указанные требования распространяются на все вышеупомянутые исходные данные и нормативные документы, с помощью этой информации обеспечивается перенесение на вновь проектируемые корабли того положительного опыта морской практики, который был накоплен в результате эксплуатации и боевого применения предыдущих поколений кораблей в составе Военно-Морского Флота.

Помимо общих технических требований и ТТЗ на проектирование корабля при его создании должны выполняться также требования определенных (государственных) стандартов, норма-

лей, методических указаний, отдельных совместных решений, а также всех руководящих документов Военно-Морского Флота, определяющих организацию службы на корабле, правила его боевого применения и эксплуатации, нормы снабжения.

Эти документы составляют четвертую группу исходной информации для проектирования корабля.

В пятую группу объединяются различного рода требования к отдельным конструкциям, устройствам, узлам, методам и способам их расчета, правила обустройства и оформления помещений и т. д., задаваемые и используемые на рабочем уровне применительно к второстепенным вопросам. Эта информация содержится в частных методиках, методических указаниях, совместных протоколах, внутренних документах проектных организаций технологического характера и т. п.

Кроме указанного при разработке проекта корабля необходимо также учитывать результаты различного рода опытных, научно-исследовательских, экспериментальных и других работ в области кораблестроения, эксплуатации и судоремонта, отражающие последние достижения науки и техники. При этом для широкого круга специалистов, участвующих в процессе проектирования корабля, обязательным является инициативный поиск и ознакомление с как можно большим числом вновь появившихся проектных, технических и технологических решений в области военного кораблестроения, связанных с ним и достаточно далеко отстоящих областей научно-технической деятельности.

Для успешного выполнения проекта современного боевого корабля необходимо знание и умелое применение всех указанных выше исходных данных и нормативных документов.

Таким образом, приступая к разработке проекта корабля, в качестве исходных данных и нормативных документов необходимо иметь:

- задание на проектирование;
- обобщенный и систематизированный материал по опыту проектирования, постройки и боевого использования кораблей отдельных классов отечественной и иностранной постройки;
- общие технические требования к надводным кораблям ВМФ;



отраслевые (государственные) стандарты, нормы, методические указания, совместные решения, а также руководящие документы Военно-Морского Флота;

требования к отдельным конструкциям, устройствам, узлам, методам и способам их расчета, правилам обустройства и оформления помещений; результаты опытных, научно-исследовательских, экспериментальных и других работ в области кораблестроения, эксплуатации и судоремонта.

Особое место в процессе формирования исходной информации для проектирования занимает вопрос выбора прототипа (ряда прототипов) будущего проекта корабля. Это связано с тем, что в недалеком прошлом проектирование кораблей и судов велось исключительно подражательным способом по образцам построенных и находящихся в плавании кораблей или, иначе говоря по прототипам. Неудачные корабли погибали и забывались, а удачные заслуживали подражания. Это объяснялось отсутствием научно обоснованных расчетных методов. По этой же причине развитие кораблестроения в давние времена проходило медленными темпами, путем незначительных отклонений и усовершенствований от проекта к проекту.

В современных условиях быстрых темпов развития науки, техники, и в частности, военного кораблестроения, переход от проекта к проекту в большинстве случаев сопровождается значительной поворотной кораблей, характеризующейся значительными (скачкообразными) изменениями основных тактико-технических элементов проекта по сравнению с плавующими кораблями. Это приводит к необходимости осторожного использования в расчетах будущего проекта статистического материала, полученного в результате обработки проектов уже построенных кораблей. Иначе говоря, время, прошедшее между проектированием смежных поколений кораблей одного класса, настолько значительно, что нельзя быть уверенным в правомерности установления подобия между аналогичными решениями или фрагментами этих проектов.

Другая причина, вызывающая затруднения с использованием данных в проектировании, заключается в отсутствии среди современных или одновременно создаваемых кораблей разра-

батываемых проектов достаточно близкого по своим тактико-техническим характеристикам и используемым проектам, тактическим и технологическим решениям корабля, или, как говорят, прототипа, т. е. такого реального спроектированного или построенного корабля, который был бы подобен разрабатываемому проекту.

Из-за этих причин в практике проектирования широко используются так называемые частные прототипы (см. п. 2.1).

Частный прототип — это корабль, отдельные элементы которого лишь частично подобны элементам проекта. Так, например, частным прототипом для расчета массы корпуса может быть выбран один из кораблей с конструкцией и архитектурой корпуса, близкими к принятым в проекте; частным прототипом для приближенных расчетов ходкости может быть выбран другой корабль с близкими формами и т. д.

Помимо использования прототипов и частных прототипов в практике проектирования имеют место и так называемые "исправленные" прототипы.

"Исправленный" прототип — это частный прототип, в который внесены конструктивные изменения при сохранении основных элементов корабля неизменными. Например, в качестве частного прототипа для расчета массы корпуса выбран реальный проект корабля, для которого найдено значение параметра  $\psi_{01}$  по формуле

$$\psi_{01} = \frac{P^*}{L_0 B H_0} \quad (3.1)$$

Пусть на выбранном прототипе имеет место удлиненный полубак, в то время как на проектируемом корабле принят корабель. Увеличение длины полубака скажется на величине параметра  $\psi_{01}$ . Для того чтобы учесть это обстоятельство при определении массы корпуса проектируемого корабля по чертежам и соответствующим элементам прототипа пересчитывает массу его корпуса, сохраняя прежние размеры и форму обводов неизменными, но изменяя относительную длину полубака в соответствии с данными на проект. В результате можно получить "исправленный" прототип, по данным которого находят

$$q = \frac{v}{L, K, H} \quad (3.2)$$

Уточненный таким образом параметр  $q$  используют для расчета массы корпуса проекта. Следует отметить, что любой прототип должен удовлетворять следующим требованиям:

— данные, полученные по прототипу, должны быть безусловно достоверными. Этому требованию в наибольшей степени удовлетворяют материалы физического проекта. Представлено большую ценность также результаты натурных и ходовых испытаний, опытных крепований, испытаний мореходности, замеров физических полей и т. д.;

— данные, привнесенные в расчет по прототипу, должны быть согласованы и взаимосвязаны элементами проектируемого корабля. Это значит, что нагрузка масс должна соответствовать принятому водоземному. Для проекта  $M$  прототипа нагрузка должна быть рассчитана по одному и тому же стандарту (нормала). Такие элементы прототипа, как длина, ширина, осадка, коэффициенты попереч, метакентрические радиусы, возмещение центра величины и т. д., должны соответствовать одной и той же батарее. Удельные расходы топлива прототипа должны отвечать вполне определенному режиму работы энергетической установки и т. д.;

— выбранный прототип, или частный прототип, должен быть предварительно тщательно изучен, чтобы конструктор ясно представлял себе все преимущества и недостатки прототипа. В противном случае допущенный принципиальный недостаток прототипа может быть перенесен в новый проект и вынудит лишь тогда, когда его исправление будет сопряжено со значительными затратами.

Таким образом принятые элементы прототипа, как оружие и вооружение, состав главной энергетической установки, основные скелетные решения общего расположения, наиболее важные архитектурно-компоновочные решения корпуса и надстройки, элементы остойчивости, непоплавистости, мореходности и ходовости, главные размеры, водоземность и т. д. по-

лучшим образом отличаются от заданных или предполагаемых элементов проекта. В противном случае применение закона подобия при переносе с прототипа на проект может дать значительные погрешности. Опыт проектирования показывает, что немедленная массе незавершенных грузов не должны превышать  $15 \cdot 10^4$  т и скорости хода —  $10^3$ . По остальным элементам установление этих пределов связано с серьезными затруднениями и даже невозможностью в процессе проектирования путем взаимосторонней проверки правильности полученных результатов.

Особое место в работе по получению исходных данных проекта по прототипам занимает восстановление неизвестных или неточных (сомнительных) данных. Прежде всего это относится к кораблям (проектам) иностранной постройки, используемым в качестве прототипа. Однако подобная ситуация возникает и при выборе в качестве прототипа проекта отечественной разработки, находящегося на ранней стадии проектирования (довольно типичный случай для сравнительной оценки проектов, участвующих в конкурсе), а также тогда, когда проектные материалы используемого прототипа выпадены в соответствии с уже отмеченными нормативными документами или отчетные материалы были представлены неполностью.

Восстановление исходных данных может вестись заблаговременно (в целях накопления банка данных о кораблях вообще) а также в процессе выполнения вполне определенного проекта. Основой для решения этой задачи является тот факт, что большая часть элементов проекта представляет собой функционально связанную систему. Кроме того, как это уже отмечалось в начале настоящего параграфа, также условия плавания и боевого применения корабля в целом ряде случаев создают предпосылки к достижению известного взаимного влияния отдельных элементов характеристик корабля по ряду координат данных (длина, диаметр, состав оружия и вооружения и т. п.). При этом, если первое из указанных направлений решения задачи восстановления исходных данных представляется существующие методичкой принципиально-методической связи между известными и недостающими элементами проекта (близкая аналогия), то второе направление осуществляется только на предположении об отноше-

тельной устойчивости и неизменности искомого элемента (простая аналогия).

В качестве иллюстрации к сказанному можно рассмотреть пример восстановления такого элемента данных размеров корабля, как осадка ( $T_{\text{ос}}$ ). Известно, что в ряде справочников по тем или иным причинам значение осадки корабля указывается или дается неточно. В то же время, значения длины корабля по ватерлинии  $L_{\text{вл}}$  и его ширины  $B_{\text{вл}}$  наблюдаемы и измеримы, а значение водоизмещения может быть восстановлено по общему ряду косвенных признаков (мощность главной энергетической установки, скорость полного хода, состав оружия и вооружения и т. п.). Тогда значение осадки анализируемого корабля  $T_{\text{ос}}^1$  можно найти из известного выражения

$$T_{\text{ос}}^1 = \frac{D_{\text{вл}}}{\Delta L_{\text{вл}} R_{\text{вл}}} \quad (3.5)$$

Значение же коэффициента обшивки полноты для кораблей одного класса обладает достаточной устойчивостью и может быть всегда определено.

Если данные, необходимые для заполнения выражений типа (3.3), достаточно уверенно вычислить не удается, переходят к вероятностной схеме расчета. В этом случае результат получается в виде оценки.

При подготовке исходных данных для проектирования нередко возникает ситуация, когда прототип (частичный прототип) обладает настолько ярко выраженными индивидуальными чертами, что для их сглаживания в будущем проекте необходимо рассматривать не один, а некоторое семейство прототипов. В этом случае расчет с прототипа заменяется статистической обработкой серии прототипов в условиях предельно малой выборки (см. п. 2.3).

В целом использование прототипов в проектировании требует проведения систематической и кропотливой работы по накоплению, анализу и изучению опыта отечественного и иностранного кораблестроения.

Очень важное значение при разработке проекта приобретают и другие источники информации. Это научно-техническая литература, материалы научно-исследовательских работ, отчеты о проведенных испытаниях и экспериментах, диссертации, авторские свидетельства и патенты и т. д.

Критический и правильный анализ выполненных ранее проектов является необходимой основой всякого нового проекта корабля.

### 3.1. СТАДИИ РАЗРАБОТКИ ПРОЕКТА И ИХ КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В практике проектирования [410] имеют место следующие стадии разработки проекта:

- научно-исследовательские поисковые работы, направленные на определение облика будущего корабля;
- аванпроект;
- разработка и согласование тактико-технического задания (ТТЗ) на проектирование корабля;
- эскизный проект;
- технический проект;
- рабочая конструкторская документация (рабочий проект);
- разработка эксплуатационной документации;
- разработка приемосдаточной документации;
- отработка документации на серию по результатам строительства и сдачи головного заказа.

Основными причинами многостадийности проектно-конструкторских работ в кораблестроении являются сложность и многовариантность возможных решений при создании и содержании такой сложной системы, как современный боевой корабль, большая суммарная стоимость проектно-конструкторских работ, значительные сроки разработки проекта, а также большая стоимость строительства корабля и его эксплуатации на всем протяжении жизненного цикла.

Продолжительность отдельных этапов зависит от наличия близкого прототипа, состояния разработки основных комплексующих элементов, научно-технического задела по основным подсистемам корабля.

Научно-исследовательские поисковые работы, направленные на определение облика будущего корабля

Научно-исследовательские работы по определению облика будущего корабля ведутся на различных уровнях и направлены на получение исходных данных, необходимых для формирования тактико-технического задания на проектирование.

Самые первые предпосылки к обоснованию необходимости создания нового корабля возникают по следующим направлениям:

— наличие в составе ВМФ кораблей данного класса и истечение срока начала развертывания работ по созданию нового поколения, предназначенного для замены кораблей, уходящих из состава флота;

— корректировка военно-морской доктрины страны, ведущая к изменению номенклатуры или условий решения возложенных на корабельный состав флота задач, обуславливающих необходимость введения в состав ВМФ корабля нового типа не существующего класса (подкласса);

— заметное изменение экономических условий или появление принципиально новых технических (технологических) решений, ведущих к необходимости (или позволяющих) решать возложенные на ВМФ задачи другим составом типов и классов кораблей;

— появление в мировом кораблестроении по одной из названных выше причин нового класса корабля.

Первая реализация указанных предпосылок происходит в рамках внутренних систематически проводимых в научно-исследовательских институтах ВМФ работ, направленных на выяснение общих перспектив развития корабельного состава флота. При выполнении этих работ рассматриваются также все те инициативные предложения, которые возникают в проектно-конструкторских организациях и научно-исследовательских институтах промышленности под влиянием вышеназванных причин.

Следующим этапом научных исследований по обоснованию облика будущего корабля становится работа по формированию (корректировке) предложений для кораблестроительной про-

граммы на очередной плановый период. В процессе выполнения этой работы рассматриваются возможные варианты наполнения кораблестроительной программы предложениями о создании кораблей различных классов. При этом помимо анализа всех факторов и аспектов, которые необходимо учесть при определении облика конкретного корабля, проводится исследование по балансированию количественных и качественных характеристик программы в целом как одной системы.

Только после получения принципиального решения на развертывание исследовательских работ в направлении создания нового корабля ставится научно-исследовательская работа по обоснованию его облика. Эта работа выполняется в ЦНИИ МО и носит комплексный характер. В ней, как правило, участвуют все научно-исследовательские организации ВМФ и предлагаемые в качестве будущих исполнителей проекта проектно-конструкторские бюро. Кроме этого к работе могут привлекаться по отдельным вопросам и другие организации промышленности.

Исследования по обоснованию облика будущего корабля предполагают создание оперативно-тактической модели боевого и повседневного использования корабля, модели его существования, с необходимой адекватностью отражающей все те проблемные вопросы создания корабля, на которые необходимо получить ответ в результате выполнения научно-исследовательской работы. Наконец, должна быть дана оценка экономической и производственной ситуации создания и эксплуатации корабля, также обеспеченная соответствующим комплексом математических моделей. При выполнении этой оценки должны учитываться:

- стоимость и время создания корабля;
- стоимость эксплуатации корабля;
- срок службы и возможность модернизации корабля.

Все указанные исследования, как правило, носят многовариантный характер и реализуются в рамках задач обоснования проектных решений. В качестве основного инструмента проведения исследований используется система автоматизированного исследовательского проектирования.

Основной задачей этого этапа является тактико-технико-экономическое обоснование целесообразности создания корабля. При положительном решении этого вопроса основным результатом комплексной научно-исследовательской работы становится проект тактико-технического задания на проектирование. Кроме этого, в процессе выполнения работы формируются основные архитектурно-компоновочные решения, проводятся экспертизы и делаются оценки наиболее значимых свойств корабля.

Следующая стадия разработки проекта осуществляется одновременно в рамках комплексной работы и параллельно с обоснованием ТТЗ. На этом этапе выполняются проектные проработки, позволяющие уточнить облик будущего корабля и ответить на ряд вопросов, связанных с практической реализацией будущего проекта. Проработки выполняются в нескольких вариантах и должны учитывать размер имеющихся стелей, наличие основных контрагентских поставок, возможности существующих ремонтных баз и средств базирования, глубины фарватеров и т. д., а также содержать перечень мероприятий, обеспечивающий возможность создания корабля, и оценку необходимых для их реализации капиталовложений и трудоемкости. Эта стадия разработки проекта (как правило, выполняется бюро-проектантами инициативно) получила название аванпроекта (иногда говорят технические предложения или предэскизный проект).

#### **Разработка и согласование тактико-технического задания на проектирование корабля**

Целью этой стадии проектирования является определение возможности создания корабля, удовлетворяющего поставленным требованиям. На этой стадии выводится состав исполнителей проектирования, определяются сроки создания корабля, разрабатываются предложения для завода-строителя и решения по принципиальным вопросам подготовки производства. Начиная с этапа согласования тактико-технического задания и на всех последующих стадиях разработки и реализации проекта работа ведется только одним бюро-проектантом.

При проверке реальности выполнения ТТЗ производится анализ достижимости указанных в задании требований, аргументируется их корректировка, уточняются отдельные проектные и конструкторские решения.

ТТЗ должно разрабатываться в объеме, достаточном для выдачи частных технических заданий на разработку исполнителями отдельных его подсистем.

До утверждения ТТЗ должны быть решены все научные проблемы и проверена возможность технической реализации будущего корабля.

Одновременно с утверждением ТТЗ должны быть подготовлены решения для обеспечения разработки эскизного проекта. Итогом этой стадии является утвержденное ТТЗ.

#### **Эскизный проект**

Эскизный проект является первой стадией проектирования корабля и выполняется бюро-проектантом по договору с заказчиком (ВМФ). В качестве основания для заключения такого договора выступает утвержденное тактико-техническое задание.

Целью эскизного проекта являются расчет и проектно-конструкторское обоснование варианта корабля, наиболее полно отвечающего требованиям ТТЗ.

Эскизный проект должен подтверждать реальность создания корабля и обеспечения его нормальной эксплуатации и боевого использования после постройки.

Эскизный проект является новым циклом проектирования, уточняющим основные технические решения. Одной из основных организационно-технических проблем данного этапа проектирования корабля является организация проектирования и научно-техническое обоснование корабля как сложной системы.

Основной организационной проблемой стадии эскизного проектирования является организация системного подхода к проектированию всех подсистем и элементов корабля на базе согласованного и утвержденного ТТЗ через частные технические задания исполнителям, а также координация работ по организации отдельных подсистем корабля внутри ЦКБ-проектанта.

В процессе рассмотрения эскизного проекта проверяется соответствие принятых в нем технических решений уровню развития науки и техники. В результате формулируются замечания и предложения к нему, которые рассматриваются проектантом и заказчиком. По замечаниям и предложениям принимается соответствующее решение.

Данный этап является последней стадией проектирования, когда заказчику предоставляется возможность относительно безболезненно прервать по тем или иным причинам дальнейшую разработку проекта. Это объясняется тем, что на этом этапе еще не заключены контракты с контрагентами на разработку и производство тех или иных комплексов и оборудования. Поэтому прекращение дальнейших работ не приведет к серьезным производственным затратам.

По утвержденному варианту эскизного проекта принимаются решения о постройке корабля и разработке технического проекта. Одновременно утверждается перечень основных элементов корабля и перечень мероприятий, обеспечивающих разработку технического проекта. Окончательно уточняется завод-строитель, намеченный при утверждении ТТЭ. Готовятся решения об участии исполнителей в работах по техническому проекту корабля, а также о проведении или продолжении необходимых опытных и конструкторских работ. Устанавливаются или уточняются сроки проектирования, строительства и сдачи корабля заказчику.

### Технический проект

Основной целью технического проекта является разработка полного комплекта чертежей и спецификаций, который необходим для разработки рабочих чертежей. Это практически последняя стадия творческих проектных работ, окончательно подтверждающих договорные тактико-технические характеристики корабля. На этой стадии окончательно определяется итоговая численность личного состава, стоимость постройки. На стадии технического проектирования разрабатываются все конструктивные элементы в объеме, обеспечивающем разработку рабочих чертежей, выпускается заказная документация

ские условия, разрабатываются принципиальная технология, сетевой график постройки и сдачи корабля, определяются все необходимые мероприятия по подготовке производства.

Технический проект обеспечивает выполнение заданного объема внутрипроектной и межпроектной унификации оборудования, использование оптимальных условий завода. Предусматривается проведение сверхоблаженного в период постройки корабля и разработки макетных чертежей для натурной проверки условий работы механизмов, оборудования и т. д. на ответственных постах.

На этом этапе проектирования организационные проблемы разрешаются совместно подразделениями ЦКБ-проектанта и основными исполнителями. К числу таких проблем можно отнести:

- определение достоверных исходных данных для разработки проекта и обоснование принятых проектно-конструкторских решений;
- реализацию системного подхода при проектировании всех подсистем корабля контрагентами и ЦКБ-проектантами;
- финансирование и своевременное подключение к работе контрагентов на основе заключенных с ними контрактов;
- организацию объемного метода при проектировании наиболее сложных и насыщенных помещений, таких как машинные отделения, наиболее сложные комплексы, посты, хранилища и др.;
- обработку заказной документации, своевременное сотрудничество с основными поставщиками и включение в планы поставок кораблей, имеющих длительные сроки изготовления.

Технический проект должен содержать все окончательно принятые технические решения, дающие полное представление о корабле, данные о необходимой для постройки кооперации и все исходные данные для разработки рабочих чертежей. Технический проект разрабатывается в одном варианте в соответствии с утвержденным вариантом эскизного проекта.

На стадии технического проекта помимо ЦДНИИ МО, осуществляющего научно-техническое сопровождение проектирования с начала его проведения, к контролю за выполнением про-

екта подключается военное представительство МО в ЦКБ-проектанта.

### **Рабочая конструкторская документация и строительство корабля**

Вследствие длительности цикла разработки чертежей, быстрого морального старения современной техники строительство корабля часто начинается до окончания разработки всех рабочих чертежей. В связи с этим к основным организационным проблемам в работе ЦКБ-проектанта можно отнести следующие: завода-строителя рабочими чертежами в соответствии с генеральным графиком создания корабля; высокого качества рабочих чертежей; авторского надзора и технической помощи заводу-строителю.

Чрезвычайно важной задачей проектантов на этой стадии является контроль и оказание помощи заводу по своевременному и полному заключению заводом контрактов на поставку основной комплектующего оборудования, особенно опытных и головных образцов техники.

В зависимости от принятой на заводе технологии строительства ЦКБ должно выпускать рабочие чертежи по районам или технологическим комплексам (блокам, модулям) в соответствии с поверженным графиком, согласованным с заводом-строителем, в основе которого лежит генеральный график создания корабля.

На основе рабочих чертежей разрабатывается технологическая документация, поступающая в цеха для сборочных и сварочных работ, изготовления оснастки, организации работ и т. д.

С началом строительства головного корабля ЦКБ-проектант организует на заводе-строителе оперативную группу, на которую возлагается задача технической помощи заводу и авторского надзора за строительством корабля.

Главными задачами конструкторов оперативной группы являются качественное и оперативное решение всех возникающих при строительстве вопросов, выражение принимаемых решений в документации, техническая помощь рабочим завода при изготовлении, монтаже и испытании конструкций, а также осу-

ществление авторского надзора за строительством корабля в целом и его отдельных подсистем.

Все принципиальные изменения в документации после соответствующей проработки в оперативной группе, а при необходимости и в ЦКБ утверждаются главным конструктором и оформляются оперативной группой.

Изготовление рабочей конструкторской документации ЦКБ-проектант осуществляет по заказу завода-строителя корабля. Контроль этого этапа со стороны Министерства обороны ведет военное представительство в ЦКБ-проектанте.

### **Разработка эксплуатационной документации**

Успешная эксплуатация корабля в значительной степени зависит от подготовки личного состава корабля к правильной эксплуатации его основных механизмов, систем, оборудования, оружия и вооружения. ЦКБ-проектант после разработки основной части рабочих чертежей должен разрабатывать следующую эксплуатационную документацию:

- описания и инструкции основных систем;
- инструкции по эксплуатации, определяющие порядок работы операторов как повседневную, так и в условиях аварийных ситуаций;
- специальные своды по обеспечению живучести и непотопляемости, взрыво- и пожаробезопасности, радиационной безопасности и т. д.

Основная эксплуатационная документация должна быть передана на строящийся корабль в момент начала швартовых испытаний и до вождения личного состава на строящийся корабль. Описания и инструкции составляют после выпуска рабочих чертежей с использованием материалов технического проекта по условиям эксплуатации основных механизмов и систем. Технические описания и инструкции по эксплуатации предназначаются для изучения матерьяльной части корабля, принятия действий и правил эксплуатации оборудования, а также для руководства при устранении неисправностей и выполнении ремонтных работ силами личного состава.

В состав эксплуатационной документации входит часть рабочих чертежей и технического проекта, образующая отчетную документацию, откорректированную по результатам постройки и испытаний корабля.

В состав эксплуатационной документации входит также тактико-технический формуляр, который после заполнения заводом характеристик, полученных на испытаниях корабля, и подписания принятого акта передается заказчику.

#### **Разработка приемо-сдаточной документации и обеспечение испытаний**

В состав приемо-сдаточной документации головного корабля входят следующие материалы:

- программа швартовых испытаний (ШИ);
- программа заводских ходовых испытаний (ЗХИ);
- программа государственных испытаний (ГИ);
- методики проведения испытаний;
- перечни необходимого обеспечения;
- графики проведения испытаний;
- бланки удостоверений и протоколов приемки отдельных механизмов и подсистем корабля.

Испытания серийных кораблей проводятся по сокращенным программам, обеспечивающим необходимые проверки подсистем корабля. Программы ШИ, ЗХИ и ГИ разрабатываются ЦКБ-проектантом корабля и утверждаются заказчиком и заводо-строителем.

До начала испытаний должна быть освоена величина ресурса основных систем и механизмов, которую допускается приращивать на всех видах испытаний, так как при превышении этой величины заводо-строитель обязан заменить механизм или восстановить его моторесурс до спецификационных величин.

Одновременно с разработкой программ и методов проведения испытаний составляется перечень необходимого обеспечения, в котором обязательно должны указываться количество и структура необходимого оборудования и обеспечения персонала, аксессуаров, судна обеспечения и снабжения, авиации, топлива,

грузов и т.п.) предоставляемого заказчиком или другими ведомствами.

На основании утвержденных программ, методов испытаний, а также перечня необходимого обеспечения заводо-строитель в лице ответственного судачки составляет рабочие программы и почасовые графики проведения испытаний, в которых должно предусматриваться возможно большее совмещение отдельных проверок и испытаний систем.

Организация и проведение испытаний существенно усложняются при отработке в слаче на головном корабле ряда опытных и головных образцов, для приема которых назначаются межведомственные комиссии (МВК), куда входят представители контрактисов-разработчиков, заводов-поставщиков этих образцов и представителей ВМФ. Работа МВК одновременно с испытаниями головного корабля требует еще большей четкости и согласованности графиков испытаний корабля и опытных образцов с учетом выделяемого заказчиком обеспечения.

Для успешной работы Государственной комиссии по приемке корабля ЦКБ-проектант до начала испытаний должен подготовить перечень решений, оформленных после утверждения технического проекта, и представить комиссии откорректированную спецификацию.

ЦКБ-проектант при проведении испытаний активно участвует в швартовке и регулировке основных подсистем корабля, в подготовке личного состава к дальнейшей самостоятельной эксплуатации, а также в оформлении и обобщении результатов испытаний.

#### **Отработка документации на серию по результатам строительства и сдачи головного заказа**

В процессе рабочего проектирования, строительства и сдачи головного корабля выявляется необходимость откорректировать часть документации, предназначенной для строительства последующих кораблей серии.

Наиболее частыми недостатками, имеющими место в рабочей документации ЦКБ-проектанта и требующими ее корректировки, являются следующие:



— неконструктивность и нетехнологичность принятых решений;

— взаимная несогласованность отдельных конструкций и подсистем корабля;

— неучет в схемах дооптимального назначения изоляции по другую сторону переборок и палуб и толщины изоляции при выборе переборочных стоек из-за опоздания выпуска схем изоляции;

— несоответствие спецификаций чертежам по количеству изделий, маркам материалов, размерам деталей;

— несогласованность проекций размещения оборудования и размеров, приводящая к неудобкам при монтаже и т. д.

Контроль за разработкой и реализацией документацией должен быть организован так, чтобы возможные ошибки были выявлены на наиболее ранней стадии создания корабля, когда цена исправления ошибок наименьшая. Основной задачей этой стадии является обработка на головном корабле основных конструкторских решений и внесение изменений в документацию для строительства серийных кораблей с целью максимального исключения переломов, которые имеют место на головном корабле.

### 3.3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ И КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ ПРОЕКТА

Последовательность разработки проекта корабля зависит от назначения создаваемого корабля, связанной с необходимостью исследовательских и экспериментальных работ, от стадии проектирования, сроков выполнения работ, количества и опыта коллектива организаций, принимающих участие в разработке проекта.

Приведенная ниже типовая последовательность разработки проекта корабля может быть отнесена к разработке эскизного и технического проектов корабля. При этом содержание и объем выполняемых работ на этих стадиях проектирования значительно отличаются. Тактико-техническое задание лежит в основе разработки эскизного проекта корабля.

Глубина разработок и объем технического проекта отличаются от эскизного проекта. В техническом проекте уточняются технические вопросы, которые в эскизном проекте были решены предварительно, и возможны дополнения и исправления полученных ранее результатов /14/.

#### Изучение тактико-технического задания и подбор исходных материалов для разработки проекта

К этому этапу, с которого начинается процесс разработки проекта корабля, следует отнести:

изучение тактико-технического задания для более глубокого понимания замысла заказчика на создание корабля и полного представления о возможной совокупности его свойств, роли и месте будущего корабля в системе сил Военно-Морского Флота;

изучение однотипных отечественных и иностранных кораблей с анализом их тактико-технических свойств для сравнения с создаваемым кораблем и их оценки;

применение комплексных методов системного анализа и методов математического программирования для глубокой и всесторонней сравнительной оценки и выбора оптимальных технических решений применительно к создаваемому кораблю;

подбор проектных и статистических материалов, материалов научно-исследовательских, экспериментальных и опытных работ, которые могут быть использованы в качестве прототипа для разработки проекта корабля в целом или его отдельных составляющих.

При изучении и подборе материалов необходимо установить численные значения или пределы изменения основных элементов корабля, удельных характеристики, параметров и постоянных, необходимых для разработки проекта корабля. Чем обоснованнее и конкретнее будут подобраны эти материалы, тем быстрее будет разработан в соответствии с заданием проект корабля.

На основе изучения ТТЗ, оценки тактико-технических характеристик проектируемого корабля, а также анализа однотипных отечественных и иностранных кораблей производится выбор основных исходных элементов проекта.

### Выбор варианта размещения вооружения и типа пусковых установок оружия

Перед исследованием возможных вариантов размещения вооружения на корабле необходимо детально проанализировать тактико-технические характеристики оружия, предназначенного для проектируемого корабля, учитывая его назначение и условия боевого использования. При этом анализ должен быть произведен на основе современных математических методов с оценкой эффективности оружия. Если это не оговорено заданием, то в число рассматриваемых вариантов включаются различные компоновочные схемы комплексов оружия. Следует иметь в виду, что общее расположение на корабле вооружения и боезапаса. Однако в связи со сложностью общего расположения окончательный его вариант должен приниматься в результате комплексного анализа. Например, размещение энергетической установки влияет на размещение приборов боезапаса, а размещение вооружения на верхней палубе необходимо согласовывать с размещением газоходов, дымовых труб и вентиляционных шахт машинных (котельных) отделений.

### Выбор типа и варианта расположения корабельной энергетической установки

Решение этого очень важного вопроса может идти двумя основными путями:

1. В задании указывается тип энергетической установки, показавшей высокие эксплуатационные характеристики в течение длительного времени использования на кораблях флота и основной промышленности. Эта энергетическая установка принимается в основу разработки проекта корабля;
2. В задании не указывается тип энергетической установки и дается полная свобода его выбора в процессе разработки проекта. В этом случае в результате изучения тактико-технических характеристик существующих типов энергетической установки совместно с машиностроителями выбирается оптимальный вариант для проектируемого корабля.

К наиболее распространенным типам расположения энергетической установки следует отнести:

линейное;  
шпентонное;  
совмещенное.

При этом применительно, например, к коллотурбинной установке, линейное расположение предполагает, что котлы и турбины размещаются в двух самостоятельных группах. Причем котельные отделения размещаются ближе к носовой части корабля, а турбинные — к корме. В этом случае обеспечивается относительно небольшая длина и как следствие уменьшается потеря в валопроводе, повышается его живучесть. К недостаткам рассматриваемого варианта расположения можно отнести увеличение длины паропровода от котлов к турбинам, из-за чего увеличиваются потери при передаче пара и снижается живучесть паропровода.

При шпентонном расположении котлы делятся на группы по числу турбин и размещаются группами вместе со своими турбинами, образуя шпентон. В этом случае увеличивается длина валопровода носовых турбин и повышается потеря в валопроводе. К положительным факторам шпентонного расположения можно отнести уменьшение потерь в паропроводе в связи с уменьшением его длины. Следует отметить, что в целом живучесть энергетической установки при шпентонном варианте ее размещения имеет преимущество перед линейным. Однако реализация шпентонного расположения связана с некоторыми затруднениями. В частности, вал носового шпентона необходимо пропускать под котлами носового шпентона. В этом случае на легких кораблях габариты котлов выходят за пределы палубы, расположенной над ними, что связано с необходимостью вырезов, устройств специальных кожухов для котлов и дымоходов. Следует также иметь в виду, что подъем котлов и размещение специальных устройств выше уровня верхней палубы повышает центр тяжести корабля и, как следствие, снижает его остойчивость. Снижение остойчивости особенно чувствительно для легких быстроходных кораблей, имеющих относительно небольшую остойчивость. Особую важность в военное время имеет живучесть энергетической установки. Поэтому для полноты оценки анализируемых вариантов расположения необходимо выполнить сравнительные

расчеты на живучесть под воздействием различного вида оружия.

### **Выбор системы и схемы защиты корабля**

После выбора принципиальной схемы размещения вооружения и эржективной установки можно перейти к выбору основных принципов защиты корабля, удовлетворяющих ТТЗ на проектирование. Защита должна обеспечивать высокую живучесть и устойчивость корабля к воздействию различных видов оружия.

Необходимо иметь в виду, что выбору элементов защиты корабля должны предшествовать:

- анализ систем и схем защиты современных отечественных и иностранных кораблей;
- анализ эффективности оружия, примененные которого наиболее вероятно по кораблям рассматриваемого класса;
- анализ научно-исследовательских, экспериментальных и опытных работ, связанных с исследованием схем и систем защиты кораблей и материалов, используемых для создания защитных преград и покрытий;
- ориентировочный объем жизненно важных помещений, подлежащих защите.

### **Выбор соотношений главных размерений и коэффициентов формы корпуса корабля**

Учитывая требования ТТЗ, проектные данные, материалы научно-исследовательских работ, моделируя и натурных испытаний кораблей рассматриваемого типа и класса, можно приступать к выбору соотношений главных размерений, коэффициентов полноты, характера строек по шпангоутам и ватерлиниям, между-шпангоут, ватерлиний и шпангоутов в оконечностях и т. д.

### **Определение главных элементов проектируемого корабля**

После выбора основных исходных данных, необходимых для начальной стадии проектирования корабля и связанных с ТТЗ, приступают к определению главных элементов проекти-

руемого корабля, одного из основных этапов всего процесса проектирования.

Определение главных элементов корабля на начальной стадии проектирования, как правило, ведется в двух приближениях.

Целью первого приближения являются:

- приближенная оценка водоизмещения и главных размерений корабля;
- составление эскизов и схем общего расположения;
- обработка конкретных исходных данных для второго приближения.

Второе приближение представляет собой относительно самостоятельный этап проектных работ, в процессе выполнения которого на основе вариации элементов проекта, отражающих его основные свойства, определяется оптимальные главные элементы проектируемого корабля.

Для определения главных элементов корабля на начальной стадии проектирования можно воспользоваться моделями и методами, изложенными в гл. 7, 8.

### **Проектирование теоретического чертежа**

При проектировании теоретического чертежа корабля основными исходными данными являются главные размерения и коэффициенты формы корпуса. От правильного выбора этих исходных данных в определенной степени будет зависеть удовлетворение требований к основным свойствам проектируемого корабля. Таким образом, непосредственному построению теоретического чертежа должен предшествовать анализ влияния главных размерений, их соотношений и коэффициентов, характеризующих форму обводов корпуса корабля на ходкость, устойчивость, мореходные и другие свойства корабля.

Анализ зависимостей между главными размерениями, их соотношениями и коэффициентами формы корпуса корабля позволяет произвести обоснованную корректировку теоретического чертежа в процессе его построения и выбрать вариант, в наибольшей степени удовлетворяющий комплексу предъявленных требований. Следует отметить, что самым надежным путем проектирования теоретического чертежа является путь, связанный с

Испытанием в опытовом бассейне серии моделей, представляющих варианты с различными соотношениями главных размеров и коэффициентами формы обводов корпуса. В результате сравнения результатов испытаний серии моделей выбирается вариант с формой корпуса, обеспечивающей наилучшие скоростные и мореходные свойства. При наличии в бассейне материалов по результатам проведенных ранее испытаний моделей рассматриваемого типа и класса кораблей объем испытаний моделей для проектируемого корабля может быть резко сокращен. Снижаются затраты на проведение испытаний в бассейне также в случае широкого привлечения на первом этапе моделирования современной вычислительной техники.

Способы и приемы анализа влияния соотношений главных размеров и коэффициентов формы корабля на его основные свойства, а также методы построения теоретического чертежа корабля изложены в ст. 9.

#### Расчет и построение кривых элементов теоретического чертежа

После построения теоретического чертежа обычно приступают к расчету и построению кривых элементов этого чертежа. На этом этапе вычисляются водозащемление, положение центра вращений, площади ватерлиний, шпангоутов, метacentрические радиусы, моменты инерции площадей ватерлиний, коэффициенты водозащемления, ватерлиний, шпангоутов и т. д. По результатам этих вычислений строятся кривые элементов теоретического чертежа, строятся по ватерлиниям и шпангоутам, грузовой размер и т. д. Все вычисления обычно производятся с помощью таблиц. Форма таблиц и порядок таких вычислений приводятся в учебниках по судне корабля.

#### Расчет ходкости корабля

К расчету ходкости обычно относят расчет полного сопротивления воды движению корабля, эффективной и валовой мощности, расчет винта.

Сопротивление воды движению корабля на начальной стадии проектирования может быть определено:

- по эмпирическим формулам;

- с помощью графических зависимостей, построенных по данным результатов серийных испытаний модели;

- пересчетом кривых сопротивления корабля-прототипа.

Последний способ часто применяется с учетом отступлений проектируемого корабля от прототипа по соотношениям главных размеров или коэффициентам формы обводов корпуса корабля.

Необходимо иметь в виду, что эти способы не обеспечивают высокой точности расчетов. Самым приближенным следует считать способ определения сопротивления по эмпирическим формулам, которые могут применяться только на ранних этапах проектирования. К более точному способу определения сопротивления можно отнести способ, основанный на использовании графических зависимостей, построенных по результатам серийных испытаний модели.

Наибольшую относительную точность обеспечивают способ пересчета сопротивления по прототипу (особенно экстраполяционный способ, позволяющий учесть при проектировании корабля влияние отступлений от прототипа по относительным размерам и форме обводов корпуса). Необходимо отметить, что формулы и графики, используемые для определения сопротивления воды движению корабля, позволяют определить полное или остаточное сопротивление. При прочих равных условиях предпочтительнее следует отдавать формулам и графикам, дающим остаточное сопротивление, так как сопротивление трения в процессе проектирования корабля может быть определено тем же способом, которым пользуются в опытовых бассейнах. Зная полное сопротивление воды движению корабля, легко определить эффективную (буксирочную) мощность.

Для определения мощности главных механизмов (равной примерно мощности на винтах) необходимо установить величину дросельного коэффициента, зависящую от элементов гребного винта. Для расчета элементов гребного винта можно воспользоваться одним из методов, изложенных в учебниках по теории корабля.

При расчете гребного винта следует иметь в виду, что от качества принятого гребного винта зависит мощность главных

механизмов, необходимая для достижения заданной скорости полного хода, а от числа оборотов гребного винта зависят масса, габариты и тип энергетической установки, а также характеристики акустического поля корабля.

Известно, что для повышения коэффициента полезного действия винта можно снизить число его оборотов, однако снижение числа оборотов может привести к увеличению массы и габаритов энергетической установки. Таким образом, выбор элементов гребного винта необходимо связывать с анализом элементов энергетической установки и заданным уровнем акустического поля корабля.

#### **Расчет вместимости корабля**

Вместимость корабля характеризуется суммарными объемами и площадями всех помещений и отсеков, размещенных в корпусе корабля по верхнюю палубу и в закрытых помещениях надстроек.

Расчет вместимости в процессе разработки проекта корабля заключается в аналитической или графической проверке возможности размещения в корпусе и надстройках необходимых по существу назначения корабля вооружения, боезапаса, механизмов, служебных и жилых помещений и т. д.

Расчет вместимости корабля можно разделить на три основных этапа:

- расчет потребного объема и площади корабля, необходимого для размещения вооружения, боезапаса, механизмов, служебных и жилых помещений и т. д.;
- расчет фактического объема и площади корабля по главным размерениям и коэффициентам формы обводов корабля;
- проверка достаточности вместимости корпуса по объемам и площадям и корректировка проекта при необходимости.

Классификация внутренних помещений корабля дается в параграфе 10.1. Модели и методы определения главных элементов корабля с учетом вместимости изложены в параграфах 7.2, 8.2, 10.2 и 10.3.

Следует иметь в виду, что расчет вместимости предусматривает корректировку после составления чертежей общего расположения.

#### **Разработка чертежей общего расположения**

Чертежами общего расположения в проекте корабля называются чертежи размещения вооружения, боезапаса, механизмов, систем, устройств, боевых постов, личного состава, общекорабельных и других помещений и оборудования, необходимых для выполнения задач, связанных с назначением корабля.

Разработка чертежей общего расположения представляет собой один из самых ответственных этапов проектирования корабля.

Основным и наиболее информативным чертежом общего расположения является продольный разрез. На этом чертеже в разрезе показывается только корпус и надстройка корабля. Все "пятики" корпуса, т. е. механизмы, оборудование, стеллажи, трубопроводы, мебель и т. д., изображаются контурными линиями при возможно большем упрощении. Принципы и приемы проектирования чертежей общего расположения изложены в параграфе 10.1.

#### **Расчет нагрузки масс в первом приближении**

После окончания разработки чертежей общего расположения, т. е. размещения вооружения и боезапаса, энергетической установки и топлива, общекорабельных помещений, личного состава и т. д., а также принята схема конструктивной защиты корабля производится предварительный расчет нагрузки и координат центра масс корабля по высоте и длине.

## РАЗДЕЛ II

### МОДЕЛИРОВАНИЕ, АНАЛИЗ И НОРМИРОВАНИЕ СВОЙСТВ НАДВОДНОГО КОРАБЛЯ

#### Глава 4. СИСТЕМА ОБЩИХ ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ ВМФ

##### 4.1. РОЛЬ И ЗАДАЧИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ УЧРЕЖДЕНИЙ ВМФ В ОСНОВАНИИ ТРЕБОВАНИЙ К НАДВОДНЫМ КОРАБЛЯМ И СУДАМ ВМФ

Военно-Морской Флот, как один из видов Вооруженных Сил является значимым элементом силовой структуры государства. В целом, и особенно в мирное время, Военно-Морским Флотом решаются три основные группы задач: боевая подготовка и поддержание в высокой степени боевой готовности частей, соединений и кораблей ВМФ; обеспечение высокой технической готовности корабельного состава и его боевой эксплуатации; обеспечение строительства новых кораблей, создания перспективных образцов оружия, вооружения и технических средств, систем их боевого управления. При этом, если первые две группы задач обеспечиваются структурами ВМФ, подготовка кадров для которых осуществляется последовательно, начиная с первичных должностей на кораблях и в частях и кончая высшим звеном управления флотом, то решение задач строительства кораблей и создания оружия, вооружения и технических средств для них требует дополнительной подготовки офицерского состава в областях деятельности, достаточно далеко отстоящих от круга вопросов, с которыми приходится сталкиваться корабельному офицеру. Весь комплекс знаний, необходимый для успешной деятельности по последнему направлению обычно, принято объединять единым термином "военное кораблестроение".

В настоящее время в системе вузов Военно-Морского Флота существует единственное учебное заведение — ВВМУ им. Ф. Э. Дзержинского (кораблестроительный факультет), ведущее целенаправленную подготовку военных инженерно-кораблестроителей. Поэтому к офицерам именно этой специальности предъявляются наиболее высокие требования по знанию условий промышленного производства судостроительной отрасли, особенностей экономической деятельности научных и проектных организаций, судостроительных предприятий, а также системному проектированию кораблей и судов Военно-Морского Флота. Наряду с вопросами, связанными с организацией и экономической деятельностью промышленных предприятий судостроительной отрасли, военный инженер-кораблестроитель должен глубоко знать весь круг кораблестроительных дисциплин: теорию корабля, строительную механику и теорию проектирования, а также быть широко эрудированным в области оружия, вооружения и технических средств корабля, тактики его применения. Вторичную подготовку инженеры-кораблестроители проходят в Военно-морской академии, где они получают высшее военное образование, более глубокие знания в области кораблестроения, организационной деятельности судостроительной отрасли и органов кораблестроения и вооружения ВМФ.

Для обеспечения деятельности в области военного кораблестроения в Военно-Морском Флоте функционирует система заказа кораблей и судов ВМФ, комплектующих их оружия, вооружения и технических средств. Основными задачами этой системы являются выполнение программного планирования военного кораблестроения на перспективу, обеспечение проектирования и строительства кораблей и судов ВМФ, разработки НИР и ОКР в промышленности, контроль за эффективным использованием средств, выделяемых на военное кораблестроение, формирование требований к перспективным кораблям и судам, разработка нормативно-технической документации по армейской номенклатуре. В систему заказа помимо ее руководства входят главные и центральные заказывающие управления. Научной базой Управления кораблестроения ВМФ является Центральный научно-исследовательский институт МО РФ (военное ко-

раблестроения ВМФ), а контроль за деятельностью научно-исследовательских и проектных организаций и промышленных предприятий, участвующих в создании кораблей и комплексуемых его оружия, вооружения и технических средств, возлагается на военные представительства Министерства обороны. Помимо ЦНИИ МО РФ, аналогичные функции в интересах заказчика выполнят управления выполняет ряд научно-исследовательских учреждений (НИУ), образующих вместе систему НИУ ВМФ. Эти НИУ решают в том числе и задачи по обеспечению создания оружия и вооружения для перспективных кораблей по присвоенной номенклатуре.

Как комплексное научно-исследовательское учреждение ЦНИИ МО РФ ведет самостоятельные широкомасштабные исследования практически во всех областях военного кораблестроения. С другой стороны, институт выступает как орган научно-технического контроля за деятельностью научных и проектных организаций промышленности, выполняющих заказы в интересах Военно-Морского Флота. Одним из основных инструментов контроля качества создаваемых для ВМФ кораблей является система так называемых общих технических требований, выдвигаемых заказчиком к боевым и эксплуатационным свойствам корабля. Система представляет собой ряд согласованных между собой видовых нормативно-технических документов, определяющих на качественном и количественном уровне требования Военно-Морского Флота к создаваемым для него кораблям, оружию, вооружению и техническим средствам. По мере изменения взглядов ВМФ и совершенствования вооружения и технических средств требования корректируются и периодически перендаются.

Особенно, что замыкает Военно-Морского Флота на корабль, как на военно-техническую систему, являющуюся в свою очередь элементом системы сил всего Военно-Морского Флота, не может быть достаточно полно выражен с помощью только такого документа, как общие технические требования. При создании корабля его характерные отличительные особенности закрепляются прежде всего в тактико-техническом задании на проектирование (ТТЗ). Тактико-техническое задание разрабатывается спе-

циалистами ЦНИИ МО РФ и согласовывается со всеми заинтересованными научными и проектными организациями. Этот документ ложится в основу создания будущего корабля. Помимо общих технических требований и ТТЗ на проектирование корабля при его создании должны выполняться требования отраслевых (государственных) стандартов, методических указаний, отдельных совместных решений, а также всех руководящих документов Военно-Морского Флота, определяющих организацию службы на корабле, правила его боевого применения и эксплуатации, нормы снабжения.

Вся совокупность нормативно-технических документов, обеспечивающих создание современного боевого корабля, преследует несколько целей. Главная из них состоит в создании образа корабля, настолько точного и определенного, что в результате последующего проектирования расхождение между видением будущего корабля у проектианта и заказчика было бы минимальным. Подлежащая часть задач при достижении этой цели решается в рамках тактико-технического задания.

Кроме того, этот комплекс документов предусматривает сохранение единообразия в технических решениях применительно ко всем кораблям флота и выполнение требований, указанных в нормативных документах более высокого уровня. Решение этой задачи обеспечивается всей системой общих технических требований и стандартов, другими нормативно-техническими актами.

Третья задача, решение которой обеспечивает нормативно-технические документы ВМФ, не имеет под собой какой-то самостоятельной научной базы и заключается в стремлении перенести на вновь проектируемые корабли тот опыт морской практики, который был накоплен в результате эксплуатации и боевого применения предыдущих поколений кораблей в составе Военно-Морского Флота. Эта задача решается путем составления указаний на конструктивное оформление тех или иных узлов или выдвигания требований к оборудованию помещений, размещению устройств. В большинстве своем эти требования содержатся в общих технических требованиях.

Четвертая и последняя задача, на решение которой нацелена система нормативно-технических документов, не кажется такой

очевидной, как первые три. Суть ее заключается в самой методологии формирования системы требований ВМФ к создаваемым для него кораблям и судам. С математической точки зрения всякое требование, вынесенное количественную сторону выражения, представляет собой ограничение типа равенства  $F(x) = a$  или неравенства  $F(x) > a$ , где в левой части стоит модельная функция того или иного свойства корабля, относительно которого и выставляется настоящее требование. Поэтому каждое в отдельности требование либо носит характер задания возможной области изменения рассматриваемого свойства или параметра, либо содержит точное указание его значения. Например, при нормировании устойчивости кораблей Военно-Морским Флотом выдвигается требование, чтобы начальная поперечная метацентрическая выкога была не меньше некоторой наперед заданной величины. Примером задания требования в виде ограниченной типа равенства может служить указание на габаритные размеры проходов, сходок, мебели и т. п., в. с. во всех случаях, когда должны учитываться антропометрические характеристики личного состава корабля. Очевидно, что такие требования несут смысловую нагрузку не только при нормировании свойств и параметров, но и при их унификации.

В отличие от требования модель того или иного свойства показывает, в какой степени корабль обладает моделируемым свойством, но при этом никаких ограничений на область изменения этого свойства не накладывает. Совокупность моделей создает целостный образ корабля и позволяет осуществлять балансирование его свойств между собой. При этом механизм балансирования может быть самым разным. Наиболее распространенным сегодня является балансирование с помощью критериев более высокого уровня, но возможны и другие подходы (теоретические аспекты проблемы балансирования свойств будут изложены в последующих разделах учебника). Вместе с тем построение совокупных модельных комплексов, как правило, сопровождается сильным упрощением входящих в них моделей отдельных свойств, что ведет к снижению их адекватности и в конечном счете полезности модели в целом. Рассмотрение же отдельных свойств корабля не решает задачу балансирования

свойств в целом. Поэтому в практике проектных исследований принято обоснование свойств создаваемого корабля проводить поэтапно. Сначала на комплексных моделях с использованием систем автоматизированного исследовательского проектирования (САИР) осуществляется балансирование основных свойств и только в самом первом приближении. Затем на моделях, разработанных в соответствующих предметных областях знания и с гораздо большей степенью адекватности, чем та, которой обладает комплексные модели, выполняются исследования по уточнению предполагаемых границ области изменения моделируемых свойств. При проведении таких фрагментарных исследований должны учитываться результаты моделирования в первом приближении и вся та информация, которая может быть получена из предметной области. Результатом этого моделирования являются значения постоянных, составляющих правую часть ограничений и представляющих, по сути, формализацию требований, выдвигаемых ВМФ к исследуемому свойству или параметру корабля. Возможны и различные промежуточные этапы, когда в качестве комплекса свойств (параметров) рассматриваются только пары, тройки или четверки наиболее значимых и критичных свойств. Основная методология исследования будет сохраняться независимо от того, осуществляется ли в процессе обоснования свойств или параметров математическое моделирование или же исследование ведется на вербальном (неформальном, качественном) уровне.

Одним из характерных особенностей деятельности заказывающих органов ВМФ по обоснованию требований является необходимость точного знания области изменения нормируемых свойств перспективных кораблей и судов. В том случае, если выдвигаемые требования основываются на желании заказчика получить корабль с таким высоким уровнем свойств, который заведомо не может быть достигнут на основе современного научного знания и с помощью известных технических решений, то эти требования будут носить откровенно декларативный характер и не окажут никакого влияния на проектанта и строителя корабля. Иными словами, заведомо завышенные требования не только не



будут выведены, но и к их удовлетворению хотя бы в какой-то мере промышленность стремиться не будет, не ощущая при этом никакой ответственности в силу очевидной нереальности этих требований. Кроме этого, дополнительно будет страдать имидж ВМФ как заказчика корабля. Но и в том случае, когда требования, выдвигаемые флотом, легко могут быть выполнены проектиром и заводом-строителем, их влияние на облик создаваемого корабля также будет малозначительным, поскольку реализация этих требований не потребует от промышленности никаких сколько-нибудь заметных усилий и может быть достигнута простым переносом старых проектных и технических решений на новый корабль.

Эффективное воздействие на деятельность проектиста возможно только тогда, когда становится точно известными границы достигнутого прогресса и потенциальные возможности создателя корабля на период разработки нового проекта. В этом случае требования выдвигаются таким образом, чтобы мобилизовать ученых, проектировщиков и судостроителей на максимально возможную реализацию своего потенциала и направить его на обеспечение высокого уровня боевых и эксплуатационных свойств перспективных кораблей. Для того чтобы такая ситуация имела место, разработчик требований должен глубоко знать свойства корабля, понимать механизм их взаимодействия и обладать точной информацией о том научном, техническом и технологическом уровне, которым обладают создатели этого корабля. Тогда, выдвигая требования несколько более жесткие, чем может обеспечить промышленность, когда можно будет создать необходимые условия для движения вперед.

На исследуемых судах кораблей и судов, условий их боевого применения и эксплуатации направлена деятельность всех подразделений научно-исследовательских учреждений ВМФ и прежде всего I ЦНИИ МО РФ. Ключевую научно-исследовательскую работу, выделенные на изучение свойств кораблей и судов и условий организации проектно-конструкторских работ и судостроительного производства, разрабатываются документы, определяющие взаимоотношения заказчика и исполнителя работ, осуществляется сопровождение научно-исследовательских и

опытно-конструкторских работ, выполняемых по заказам Министерства обороны в промышленности. Сотрудники I ЦНИИ МО участвуют в проведении экспериментов, испытаниях построенных кораблей, выполняют анализы и осуществляют обобщение и накопление опыта эксплуатации кораблей в составе Военно-Морского Флота. Одним из наиболее значимых результатов этой деятельности является выработка требований к свойствам проектируемых кораблей и закрепление их в тех или иных нормативно-технических документах.

Центральная организующая роль в этом процессе принадлежит институту главных наблюдющих за проектом. Институт главных наблюдющих представляет собой объединение групп главных наблюдющих, включаемых на оперативной основе сотрудниками I ЦНИИ МО РФ и других НИУ ВМФ. Состав групп главного наблюдющего определяется приказами руководства ВМФ, Управления кораблестроения или I ЦНИИ МО РФ применительно к каждому проекту корабля. Во главе группы стоит главный наблюдющий за проектом, назначаемый из числа наиболее подготовленных сотрудников проектных подразделений I ЦНИИ МО РФ. Обязанности главного наблюдющего за проектом в Военно-Морском Флоте и главного (генерального) конструктора проекта корабля в промышленности аналогичны. Главный наблюдющий так же, как и главный конструктор, обязан глубоко понимать замысел будущего корабля, его основные отличительные свойства. Кроме того, он должен уметь организовать работу специалистов своей группы, чтобы всегда иметь возможность контролировать состояние дел, оперативно реагировать на возникающие в процессе проектирования корабля проблемы. Не менее важным для главного наблюдющего (как и для главного конструктора) является умение проводить поиск альтернативного решения в проблемной ситуации, организовывать работу других специалистов и организаций в этом направлении, подготовить и обеспечить прохождение по институтам необходимых решений.

Вместе с тем, какой бы важной ни была организующая роль главного наблюдющего, она не может привести к успеху, если он сам и специалисты его группы не обладают достаточными

знаниями и научной квалификацией для того, чтобы понять и объяснить проблемные вопросы, возникающие в их практической деятельности. Сведение наблюдений за проектом к голему администрированию ведет к видности оперативного решения текущих вопросов, но при этом коренные проблемы, существующие практически в каждом новом проекте, остаются нерешенными в силу трудности их распознавания.

В своей деятельности в процессе наблюдения за проектом группа главного наблюдателя опирается на всю систему нормативно-технических документов, разрабатываемых в системе военного кораблестроения и прежде всего на общие технические требования. Однако по мере развития наших знаний в области кораблестроения неизбежно происходит переосмысление приоритетов и ранее установленных норм по отношению к тем или другим свойствам кораблей. При этом возможно как появление новых, ранее не рассматриваемых как актуальные свойства корабля, так и утрата теми или иными свойствами своей актуальности и вследствие этого снижение уровня требований к таким свойствам. Одним из ярких примеров резкого ужесточения требований является создание в начале 80-х годов противокорабельных средств воздушного назначения, головкой наведения которых были ориентированы на тепловое поле кораблей. В ответ на это во всех странах мира, и в том числе в нашей стране, были развернуты работы по снижению теплового поля и существенно усилены требования к нему.

Наряду с переосмыслением видения системы свойств нельзя исключать также ошибок в задании требований к тем или иным свойствам. Совместная деятельность проектных организаций с группой главного наблюдателя позволяет выявить эти ошибки. Наконец, может оказаться, что существуют объективные причины, препятствующие проектинту или заводу выполнять те или иные требования. И хотя эти препятствия могут носить не технический характер, с ними также необходимо считаться, так как без их устранения процесс создания корабля не может быть успешно завершен.

В каждом случае, когда выясняется, что требования, ранее выданные флотом, утратили свою актуальность, они должны

корректироваться. При этом следует иметь в виду, что корректировка требований (как в сторону их смягчения, так и в сторону усиления) не является чем-то исключительным в процессе создания корабля. Скорее, наоборот, вся совместная работа ВМФ и промышленности, проводимая на всех этапах создания нового корабля, представляет собой поиск определенного компромисса и согласование границ предлагаемых к кораблю требований.

#### 4.1. СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ОБЩИХ ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ ВМФ

Проблема обоснования требований возникла практически одновременно с началом создания военных кораблей. Суть видения требований заключается в том, что с их помощью заказчик стремится передать подрядчику содержание основного замысла на корабль, накопленный опыт плавания, определить общепринятые и единые для всех (или какого-либо класса) кораблей правила и нормы проектирования, а также нацелить разработчика на совершенствование технических и технологических решений в наиболее приоритетных направлениях. В настоящее время формирование требований к проектируемым кораблям представляет собой большую научную и организационную проблему. Ее решение реализуется в виде системы межведомственных (отраслевых) и видовых нормативных документов, оперативно-тактических и тактико-технических заданий, выдаваемых на проектирование кораблей, заключенной по проектам и отдельным совместным решениям заказчика и подрядчика. В данном случае нас будут интересовать только научные аспекты этой проблемы применительно к общим техническим требованиям.

Как уже отмечалось в предыдущем параграфе, система общих технических требований представляет собой ряд согласованных между собой видовых нормативно-технических документов, определяющих на качественном и количественном уровне требования Министерства обороны, и в частности Военно-Морского Флота, к создаваемым для него кораблям, оружию, вооружению и техническим средствам. На межведомственном уровне общие технические требования объединены в видовые комплек-

ты документов, содержащих системы требований к оружию, вооружению и техническим средствам по номенклатуре, присвоенной соответствующим видам и родам ВС. К видовым комплексам документов относятся также системы требований по линии некоторых главных управлений МО, выполняющих роль самостоятельных заказчиков.

Таким образом, основой для формирования подсистемы общих технических требований является понятие вида и рода ВС. Такая стройная система стала возможной только благодаря высокому уровню формирования направленности деятельности Министерства обороны по созданию материальной базы ВС. На этом уровне не только для каждого вида, т. е. ВВС или ВМФ, формируются требования к разрабатываемым в его интересах самолетам или кораблям, но и для каждого рода, т. е. аспекта деятельности МО (например, Войска связи или Бронетанковые войска). При этом для каждого вида и рода существует определенный перечень свойственных ему объектов (общевойсковые средства связи, бронетанковая техника и т. п.), применительно к которым и формируется подсистема общих технических требований. Поскольку средства родов распределены по видам ВС, вопрос межвидовой унификации этих средств решается автоматически. В наиболее полной мере это происходит в Сухопутных войсках, условия боевого применения которых отличаются высокой степенью однородности. В Военно-Воздушных Силах и Военно-Морском Флоте даже такие общевидовые средства, как средства связи или артиллерийские системы, обладают настолько большой спецификой, что требуют существенной доработки по сравнению, например, с сухопутными образцами, которая ведет к созданию практически новых разумеваемых средств. С общесистемной точки зрения процесс унификации оружия, вооружения и технических средств, создаваемых в различных видах ВС, может идти по двум направлениям: переводные унифицируемых средств из номенклатуры вида в рода ВС и выделение какого-либо одного вида в головные заказчики унифицируемых средств с обязательным согласованием требований к этому средству с теми заинтересованными видами (родами). В последнем случае ключевым вопросом станет определение го-

лового заказчика и установление координирующего механизма согласования противоречивых требований.

С целью обеспечения процесса межвидовой унификации оружия, вооружения и технических средств, а также стандартизации и упорядочения разработок единых нормативно-технических документов системы общих технических требований в самостоятельную группу документов выделены требования, определяющие положение о системе общих технических требований к видам вооружения и военной техники, порядок разработки, издания и пересмотра нормативно-технических документов этой системы, построение и типовое содержание требований, порядок проведения их экспертизы и порядок планирования разработок новых документов. Эта группа документов относится к организационно-техническим требованиям.

Среди существующих комплектов видовых документов наиболее разработанной и обладающей самой значительной историей является система общих технических требований к вооружению и военной технике ВМФ. Система включает группу головных документов, общие технические требования к оборудованию, системам и устройствам и требования к боевым и эксплуатационным свойствам кораблей и судов ВМФ. В свою очередь, группа головных документов делится на требования к собственно кораблям и судам и требования к основным корабельным комплексам оружия и вооружения.

Одной из существенных особенностей требований к кораблям и судам ВМФ, составляющих основу системы общих технических требований ВМФ, является то, что они помимо требований к боевым и эксплуатационным свойствам кораблей и судов в целом содержат также некоторые аспекты требований, более детально изложенные во всех остальных требованиях этой системы. Поэтому эти требования в отличие от остальных иногда также называют общими (хотя это и несет определенный элемент повторения: "Общие требования" и "Общие технические требования").

Поскольку каждый из видовых документов ВМФ разрабатывается либо соответствующими подразделениями ЦНИИ МО РФ, либо другими научно-исследовательскими учреждения-

ми ВМФ, необходимо обеспечить согласование частных видовых требований и тех фрагментов, которые помещаются в общие требования. Это согласование носит двусторонний характер. Так, в общие требования, как правило, включаются только те требования из частного документа, которые непосредственно влияют на проявление тех или иных свойств корабля как целостной системы. В свою очередь, условия, при которых должны выполняться те или иные частные требования и которые присутствуют в текстах этих документов, чаще всего вытекают из общих требований к кораблям и судам.

Помимо уже рассмотренных групп видового комплекта общих технических требований в системе ВМФ действуют также требования к испытанию оружия, вооружения, технических средств и кораблей (судов) в целом. Эти документы устанавливают нормы и требования к различным этапам испытаний кораблей и судов: швартовным, заводским и государственным, а также к опытной их эксплуатации. Кроме того, существуют требования к программам и методам испытания оружия, вооружения и технических средств.

Рассмотренная выше система общих технических требований начала создаваться задолго до придания ей структурной завершенности системного характера. Первые документы этого плана стали появляться в Военно-Морском Флоте в конце пятидесятых годов в связи с резким ростом номенклатуры комплектующих корабль-оружия, вооружения и технических средств, из значительным усложнением и необходимостью учета при создании корабля все новых и новых действующих факторов, требующих нормирования. Все вопросы, связанные с установлением требований к создаваемым кораблям и судам ВМФ, уже не могли быть достаточно удовлетворительно решены в существовавших тогда также нормативных документах, как тактико-техническое задание и государственные и отраслевые стандарты. Кроме того, тактико-техническое задание на проектирование не предназначено для стандартизации требований ВМФ и сохранения (передачи) накопленного опыта боевого применения и эксплуатации кораблей, а стандарты имеют целевое назначение, в основном связанное с обеспечением промышленного производ-

ства. Таким образом, возникла объективная необходимость в разработке нового типа нормативно-технических документов — общих технических требований. С правовой точки зрения эти документы являлись условными заказами (Министерства обороны), обязательными при выполнении любого заказа, на который эти требования распространялись.

По мере накопления опыта в создании общих технических требований, а также наращивания типажа вооружения и военной техники уже в рамках всех видов ВС встала проблема упорядочения требований на межвидовом уровне. Решена ее и пришло к созданию ныне действующей системы.

В процессе перехода организации и методов управления промышленным производством от директивно-планового к регулируемому рыночному механизму, который начался в конце 80-х годов и продолжается в настоящее время, изменяются роль и значение системы общих технических требований. Наиболее характерными признаками таких изменений являются следующие. Прежде всего переносится значительно большей степени ответственности за создание корабля на генерального заказчика путем передачи ему основной доли ответственности на оборону средств усиливается роль требований как показателя качества строящихся кораблей. С другой стороны, ослабление влияния ведомств оборонных отраслей промышленности на процесс производства вооружения и военной техники заметно снижает роль отраслевых, а в некоторых случаях и государственных стандартов в том виде, в котором они существовали при ранее сложившейся организации производства. До выработки и отладки нового механизма действия государственной системы стандартов, ее функция в какой-то мере должна выполняться системой общих технических требований. Наконец по мере вхождения в мировой рынок, представляющий определенные требования ко всем его участникам, встала проблема сертификации продукции, выпускаемой в том числе и для Министерства обороны. Значительную роль в сертификации вооружения и военной техники также играют общие технические требования. Таким образом, по мере совершенствования новых экономических и производственных отношений следует ожидать усиления роли системы

общих технических требований, выдвигаемых Министерством обороны к создаваемому вооружению и военной технике. Это потребует проведения значительной работы не только по завершению ранее обоснованной и периодически корректируемой и пополняемой системы требований, но и по изучению особенностей действия этого регулирующего механизма в новых производственно-экономических условиях.

Прежде чем перейти к рассмотрению содержания общих технических требований к боевым кораблям и судам ВМФ, следует еще раз вернуться к той мысли, которая уже была высказана в предыдущем параграфе. Речь идет о том, что требования, содержащиеся в нормативно-технических документах, можно разделить на три основные категории.

Одним из наиболее понятий в функциональном плане типов требований, к которому мы неоднократно обращались в процессе изложения материала настоящего параграфа, являются требования, возникающие при желании придать группе параметров или конструкций, широко распространенных на различных кораблях, единообразие. Необходимость существования таких требований очевидна и вытекает из нормативного характера самой системы общих технических требований. Очевидно также, что любое требование, помещенное в такой нормативно-технический документ, как общие технические требования, несет функцию нормирования. Вместе с тем мы выделяем этот тип требований, имея в виду, что основной целью выделения этих требований является именно функция единообразия, т. е. стандартизации. Часто требования этого типа называют нормирующими. При разработке системы требований одним из наиболее важных вопросов нормирования становится вопрос об определении уровня создаваемых нормирующих документов и их взаимодействия с государственными (мировыми) стандартами и другими нормативно-техническими актами.

Из всего круга вопросов, охватываемых системой требований, всегда можно выделить такие, которые выдвигаются непосредственно к конструкции корабля, вооружения или технического средства. Эти требования могут появляться на основе обобщения опыта морской практики и боевого применения ко-

раблей. Кроме того, часть подобных требований обосновывается с позиций здравого смысла либо как результат специальных научных исследований. Иногда такого рода требования называют конструктивными. Конструктивные требования образуют группу из рассматриваемых здесь групп требований.

Разработка нормирующих и конструктивных требований не относится непосредственно к области системного проектирования, поскольку исследования, проводимые с целью обоснования конструктивных требований, выполняются, как правило, в соответствующих предметных областях военного кораблестроения, а формирование нормирующих требований осуществляется в рамках общего направления стандартизации и унификации.

Вместе с тем во всем комплексе требований к свойствам проектируемых кораблей существует такая их значительная часть, обоснование которых возможно только при одновременном рассмотрении двух или нескольких противоречивых свойств корабля. Для определения правильных значений показателей этих свойств и выработки обоснованных требований к ним необходима разработка специальных моделей. Совокупность таких моделей позволяет создавать целостный образ корабля и балансировать его свойства между собой. Именно такие свойства, относительно значений показателей которых нельзя судить без их одновременного рассмотрения, и должны обосновываться с помощью моделей, которые мы в дальнейшем будем относить к классу системных. Требования же, обосновываемые с помощью системных моделей, обычно называются балансирующими. Они образуют третью группу требований.

Необходимо отметить, что выделенные в рассмотрении три основные группы требований: нормирующие, конструктивные и балансирующие — не закрепляются за какими-то конкретным способом образа оружия, вооружения, технического средства или корабля в целом. Иными словами, между нормируемыми свойствами и типами требований нет взаимно однозначного соответствия. Каждое из нормируемых свойств может нормироваться как в смысле первого, второго и третьего типов требований, так и любого их сочетания. Например, высота летерных стоек на надводных кораблях как требование ВМФ выполняет

функцию нормирования высоты стоек для всех кораблей и несет в себе опыт хорошей морской практики, накопленный за весь период существования отечественного флота. В то же время задание определенных требований к конструктивному оформлению корпуса корабля с точки зрения его непотопляемости является результатом решения задачи балансирования непотопляемости и вопросов общего расположения корабля.

#### 4.3. СОДЕРЖАНИЕ ОБЩИХ ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ К БОЕВЫМ НАДВОДНЫМ КОРАБЛЯМ И КАТЕРАМ ВМФ

В видовом комплексе документов Военно-Морского Флота, а точнее в головных документах этого комплекса, ведущее место занимают общие тактико-технические требования к боевым надводным кораблям и катерам ВМФ. Эти требования в наиболее полной мере отражают вопросы общего проектирования надводных кораблей и системное видение заказчиком проблем их создания. Помимо требований к боевым надводным кораблям и катерам к требованиям общего проектирования относятся также общие технические требования к кораблям специального назначения и судам обеспечения.

Поскольку создание боевого корабля предусматривает рассмотрение всего комплекса вопросов, связанных с его функционированием как тактической единицы в сугубо специфических условиях морской среды, общие тактико-технические требования, предъявляемые к кораблям ВМФ, охватывают практически все направления, в той или иной степени нашедшие отражение в общих технических требованиях видов и родов ВС. Эта особенность документов Военно-Морского Флота — отражать как в зеркале все виды и роды ВС в виде их уменьшенной и ориентированной на использование на море модели — проявляется во всех направлениях деятельности флота, в том числе и в структуре общих технических требований. Первый раз мы встретимся с этой особенностью, когда рассмотрим в предыдущем параграфе структуру видового комплекса системы общих техниче-

ских требований ВМФ. В общих тактико-технических требованиях она находит отражение в структуре самих этих требований.

Общие тактико-технические требования к боевым надводным кораблям разработаны на базе ранее существовавших аналогичных документов. В требованиях нашли отражение опыт Военно-Морского Флота по боевой и повседневной эксплуатации кораблей, опыт несения боевой службы, результаты научных исследований, выполненных в организациях ВМФ и промышленности, опыт проектирования, строительства и испытаний кораблей, их базирования и ремонта, опыт, вытекающий из боевых действий на море в локальных войнах последних лет.

В качестве основного направления, определяющего содержание требований по всем разделам, принято обеспечение высокой боевой и военно-экономической эффективности кораблей при решении ими задач в соответствии с назначением в течение всего жизненного цикла.

Несмотря на комплексность общих тактико-технических требований не заменяют другую руководящую документацию по вопросам проектирования и постройки надводных кораблей, их боевых и технических средств. Вопросы, которые по тем или иным причинам не находят отражения в общих тактико-технических требованиях, уточняются и решаются на основе следующих документов:

— нормативно-технических документов системы общих технических требований к видам вооружения и военной техники, относящихся к группе видовых документов ВМФ, а также действующих условий поставки;

— специальных требований и руководящих документов ВМФ, обеспечивающих проектирование, строительство и эксплуатацию (в том числе базирование и консервацию), ремонт и утилизацию кораблей;

— технических условий, технических и руководящих документов, государственных и отраслевых стандартов, согласованных с ВМФ.

Общие тактико-технические требования обязательно должны выполняться организациями Министерства обороны и промышленности при разработке проектов и создании надводных

кораблей. Отступления от требований допускаются в тех случаях, когда они специально оговорены в тактико-техническом задании на проектирование корабля и в спецификации на постройку или когда эти отступления технически обоснованы соответствующими проработками и расчетами и согласованы с ВМФ установленным порядком.

Реализация настоящих требований в проектах кораблей должна подтверждаться расчетами, испытаниями, измерениями, выполненными по методикам, согласованным с ВМФ, и опытно-конструкторскими работами, объем которых определяется в процессе проектирования.

Принципиально новые технические и конструкторские решения, не поддающиеся достоверному расчету действующими методами, а также новые материалы, применяемые для корпусных конструкций, боевых и технических средств, должны до их внедрения на корабль проходить испытания в натуральных или имитационных условиях. Проведенные испытания должны подтверждать, что качество материалов удовлетворяет требованиям эксплуатации и боевого использования их в корабельных условиях.

Предъявление требований в тактико-технических заданиях на проектирование и в процессе проектирования кораблей, а также их выполнение должны осуществляться с учетом общих тактико-технических требований.

Общие тактико-технические требования (ОТТТ) к боевым надводным кораблям и катерам Военно-Морского Флота, как и все другие общие технические требования, содержат разделы и подразделы, включающие требования к элементам корабля (судна) как сложной военно-технической системы. При этом архитекторами современных требований предлагается использование смешанного принципа декомпозиции (см. п. 1.2): по тем или иным материальным частям корабля (объектный подход), и с выделением в отдельные разделы (подразделы) требований к его некоторым актуальным боевым или эксплуатационным свойствам (аспектный подход). Так, в качестве объектов содержания ОТТТ предполагается выделение таких материальных подсистем корабля, как боевые средства, энергетическая установка,

электроэнергетическая система (ЭЭС), общекорабельные системы, устройства и другие. Аспектные элементы архитектурным представлением моральными свойствами, требованиями к надежности, скрытности и маскировке, живучести и стойкости к внешним воздействиям и т. п.

В соответствии с теми особенностями принципов декомпозиции, с которыми мы закончили в предыдущих разделах учебника, объектный подход в силу своей замкнутости обуславливает формирование более консервативных разделов ОТТТ. Элементы же архитектурными, отвечающие аспектовому подходу, напротив, из-за отсутствия свойства замыкания изменяются более динамично, периодически пополняясь за счет актуализации тех или иных свойств корабля. Причем в силу известной инертности мышления и общего правила формирования нормативных документов ранее введенные разделы требований к тем или иным свойствам корабля в дальнейшем уже не исключаются из рассмотрения, а только дополняются новыми. Поэтому от издания к изданию содержание ОТТТ пополняется все большим количеством разделов (подразделов), причем в большинстве своем за счет актуализации новых свойств.

В отличие от общих технических требований, выдвигаемых к видам и родам ВС, в которых, как мы видели в п. 4.2, не только каждый вид формирует требования к разрабатываемым в его интересах самолетам или кораблям, но и каждый род, т. е. аспект деятельности МО, обладает определенным уровнем самостоятельности МО объектов. ОТТТ к боевым надводным кораблям в большинстве своем не могут быть сформулированы применительно к какому-либо свойству (аспекту) как к объекту — незначительному носителю этого свойства. Так, например, требования к надежности корабля распространяются не только на весь корабль в целом, но также и на все его материальные подсистемы, также как энергетическая установка или боевые средства. В то же время в разделе, посвященном энергетической установке, содержится все требования ВМФ к этой подсистеме, в том числе и требования по надежности. При этом, если требования к энергетической установке как раздел ОТТТ существуют столько же, сколько и сами общие требования, то раздел требо-

ваний к надежности возник сравнительно недавно в связи с актуализацией этого направления в военном кораблестроении. Отмеченная особенность требует постоянного согласования отдельных аспектных и общих разделов ОТТТ.

Наиболее очевидной из всех возможных функций, выполняемых аспектными разделами требований, является функция выдвижения требований к тому или иному свойству корабля как целостной системы. Так, в разделе ОТТТ, посвященном надежности, оговариваются предельные значения таких количественных показателей этого свойства, как коэффициент оперативного напряжения, надежность, трудоемкость и стоимость выполнения межлодочного ремонта, полный срок службы корабля и некоторые другие. В то же время требования к надежности находят свое выражение применительно к отдельным конструктивным узлам и техническим решениям, которые нельзя отнести только к какой-либо отдельной подсистеме корабля. Примером такой реализации требований могут служить требования к устройству корабельной арматуры, патрубков корпусных конструкций и т. п.

В разделе же, посвященном, например, главной энергетической установке, формирование требований происходит прежде всего по признаку выделения таких ее функциональных элементов, как ядерная реакторная установка, механизмы прессы и перекачки масла, расходные цистерны и т. п. Другое направление выдвижения требований связано здесь с интегральными характеристиками главной энергетической установки: мощность установки, условия ее размещения, удельные расходы топлива и др. При этом в названном виде в требованиях к главной энергетической установке присутствуют и требования к ее надежности (например, требования к резервированию отдельных механизмов). Поэтому понятно, что вопросы требований к свойствам корабля как целостной системы должны быть согласованы с требованиями к той или иной его подсистеме в плане рассматриваемых свойств.

Выполненное сравнение особенностей формирования требований к свойствам и подсистемам корабля можно завершить указанием на то, что среди всех указанных в настоящих ОТТТ

свойств корабля существуют и такие, которые могут быть отнесены только к собственно кораблю и не распространяются на его подсистемы. Таким свойством, в частности, является живучесть. Понятие живучести связано с боевыми или аварийными повреждениями, получаемыми кораблем. При этом, например, для случая боевых повреждений, не предполагается, что противник поражает ту или иную часть корабля, а имеется в виду именно сам корабль целиком (например, прицеливание поражающего средства может осуществляться в центр наружности корабля). Поэтому и такое понятие, как живучесть главной энергетической установки или ракетно-артиллерийского комплекса, не рассматриваются.

Как уже указывалось, общие тактико-технические требования к боевым надводным кораблям носят комплексный, собирательный характер. В этих требованиях обеспечено согласование общих технических требований к оружию, вооружению, техническим средствам и различным свойствам надводных кораблей. Все эти нормативно-технические документы объединены в четыре группы, в первую (основную) из которых входит и сами общие тактико-технические требования. Помимо этих требований в головную группу включены общие технические требования к основным комплексам оружия и вооружения надводных кораблей. С точки зрения корабля как единой системы наиболее существенным в них является согласование требований, предъявляемых к кораблю со стороны каждого устанавливаемого на нем комплекса, с требованиями, выдвигаемыми к этим же комплексам от самого корабля. По сути, уровень вырабатываемых при таком согласовании требований количественно определяет степень снижения эффективности каждого комплекса, размещенного на корабле, по сравнению с его полнотонными характеристиками.

Вторая группа общих технических требований включает требования к оборудованию, устройствам и системам. Третья же группа — требования к боевым и эксплуатационным свойствам. Эти две группы требований характеризуются прежде всего тем, что в них по сравнению с общими тактико-техническими требованиями содержится 12 же требования по номенклатуре, что и в



комплексном документе, но в более развернутом виде. Такое построение не совсем последовательно относительно второй группы требований, так как можно было бы ожидать, что эти документы по своему содержанию будут в большей степени отвечать требованиям к основным комплексам оружия и вооружения (поскольку с системной точки зрения в обоих случаях имеет место объектный подход). Какие-то элементы этого подхода можно проследить в требованиях второй группы. Но все же в основном они содержат именно те особенности, которые были отмечены выше. Наверное, это можно объяснить традиционным ведомственным делением, принятым в ВМФ.

Третья группа нормативно-технических документов, содержащая требования к таким основным свойствам корабля, как мореходность, прочность, скрытность и защита по физическим полям, тем не менее также содержит некоторую часть требований к техническим средствам, обеспечивающим исключительно эти свойства. С точки зрения общего подхода к формированию общих технических требований (см. п. 4.2) это вполне закономерное, однако и здесь возникает необходимость согласования требований к техническим средствам корабля, изложенным в общих тактико-технических требованиях, общих технических требованиях к оборудованию, устройствам и системам, и тем, которые содержатся в требованиях к боевым и эксплуатационным свойствам.

Четвертая группа требований, содержащая общие технические требования к условиям проведения испытаний кораблей и судов, комплексов оружия и вооружения, занимает особое положение в системе требований. Эти требования хорошо согласуются со всеми ранее рассмотренными группами требований, так как формируются применительно к определенному и специфическому этапу жизненного цикла корабля или какой-либо его отдельной подсистемы.

Таким образом, заключая рассмотрение вопроса о соотношении принципов построения и содержания общих тактико-технических требований к боевым надводным кораблям и общим техническим требованиям к оборудованию, устройствам и системам, боевым и эксплуатационным свойствам можно отметить,

что наряду с успешным созданием относительно стройной системы нормативно-технических документов в настоящее время все еще не удается избежать некоторых противоречий, требующих дополнительной работы по согласованию всех вводимых в рассмотрение требований.

## Глава 5. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И МЕТОДЫ СИСТЕМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ КОРАБЛЯ

### 5.1. ЗАДАЧИ СИСТЕМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СВОЙСТВ КОРАБЛЯ

Теория проектирования кораблей является относительно молодой дисциплиной, хотя на протяжении всей истории кораблестроения существовала потребность в средствах теоретического обеспечения процесса создания корабля. В качестве таких средств сначала выступали самые простые законы и расчеты. Затем к решению задач проектирования стали подключаться более разработанные в теоретическом плане области знания. Наконец, на современном этапе сложилась такая ситуация, когда для решения проблем проектирования потребовалась разработка принципиально новых теоретических средств, ранее не разрабатываемых ни в одной из естественно-научных дисциплин. Сложность этих средств на разных этапах своего становления объединилась различными терминами, и сегодня наиболее распространенным из них является системный анализ. По мере развития методологии системного подхода и разработки средств системного анализа совершенствовались и продолжали совершенствоваться методы проектирования. Этот процесс может проходить по двум направлениям: по пути создания принципиально новых инструментальных средств и, соответственно, постановки новых проектных задач, и по пути методологической и методической переориентации ранее созданных и уже стоявших традиционными задач проектирования прошлых лет. Первый путь в современной теории проектирования находит наиболее активное воплощение в задачах обоснования проектных решений, при

разработке моделей синтеза и, возможно, некоторых других. Другой путь наиболее вероятен там, где существенно влияние естественно-научных дисциплин, т. е. когда решение проектной задачи во многом зависит от результатов исследований в той или иной предметной области. Именно такого рода задачи и будут нами рассмотрены в настоящем разделе применительно к моделям оценки основных свойств надводных кораблей. Длительное время этот раздел курса проектирования читался на основе задач, в разное время разработанных в основных кораблестроительных дисциплинах — теории корабля и в строительной механике — с последующей их доработкой в интересах проектирования. В данном разделе, с одной стороны, дана системная трактовка этих задач, а с другой — показано, что интересы современной теории проектирования не могут ограничиваться приложениям только этих дисциплин, а требуют привлечения к процессу проектирования всего комплекса естественно-научных знаний, которыми располагает инженерная наука.

При разработке требований к свойствам боевых кораблей необходимо определить, на какой основе, с помощью каких подходов должны формироваться эти требования. Как было показано в предыдущей главе, из всего круга вопросов, охватываемых системой требований, всегда можно выделить такие, которые выдвигаются непосредственно к конструкции корабля. Другие требования были отнесены нами к группе нормирующих. Также уже отмечалось, что формирование нормирующих и конструктивных требований не относится непосредственно к области системного проектирования, поскольку исследования, проводимые в обоснование этих требований, выполняются как правило в соответствующих предметных областях. Вместе с тем обоснование значительной части требований возможно только при одновременном рассмотрении двух или нескольких противоречивых свойств корабля. Для определения реальных значений показателей этих свойств и выработки обоснованных требований к ним необходима разработка специальных моделей. С математической точки зрения всякое требование, имеющее количественную сторону выражения, представляет собой ограничение вида равенства  $F(x) = a$  или неравенства  $F(x) > a$ , где в левой

части стоит модельная функция (то или иного свойства корабля, относительно которого и выдвигаются настоящие требования. Поэтому каждое в отдельности требование либо носит характер задания возможной области изменения рассматриваемого свойства или параметра, либо содержит точное указание его величины.

В отличие от требования модель того или иного свойства скорее отражает, в какой степени корабль обладает моделируемым свойством, при этом никаких ограничений на область изменения этого свойства не налагается. Совокупность моделей создает целостный образ корабля и позволяет балансировать его свойства между собой. Именно такие свойства, о значениях показателей которых нельзя судить без их одновременного рассмотрения, и должны обосновываться с помощью моделей, которые мы в дальнейшем будем относить к классу системных.

В период исследовательского проектирования и на всех последующих этапах создания корабля к совместной работе привлекаются специалисты из самых различных областей знания. При этом в каждой из этих областей решается, по сути, одна и та же общая задача — добиться реализации в разрабатываемом проекте наиболее эффективных (с различных точек зрения) научных и технических решений. В процессе выработки таких решений применительно к тем или иным устанавливаемым на корабле механизмам, образцам оружия и вооружения неизбежно возникает альтернативные и конкурентоспособные варианты, отличающиеся один от другого по ряду характерных параметров, причем, как правило, в разные стороны. Эти ситуации ставят перед разработчиком типичный для процесса создания корабля вопрос: положительные или отрицательные особенности нового решения преобладают в комплектованном изделии. Например, как естественно воспринимается позиция разработчика, заключающаяся в обосновании необходимости внедрения газотурбинного двигателя, поскольку он убежден в том, что преимущества предлагаемого варианта (например, экономичность) значительно "перезвешивают" его возможные недостатки (большая удельная вес, повышенная шумность, высокая надежность и ремонтотребность и др.). Однако никаких доказатель-

ных рассуждений, подкрепляющих позицию разработчика, как правило, нет, так как анализ каждого из рассмотренных в примере свойств энергетической установки требует построения математических моделей в соответствующих областях знания. Кроме того, результирующее влияние совокупности отмеченных свойств на ТТХ корабля в целом может быть оценено только путем создания некоторой обобщающей модели корабля как сложной технической системы.

Другим примером балансирования может служить принятие решения об установке на корабле перспективного образца оружия или вооружения. На ранних стадиях разработки проекта корабля перспективные образцы находятся в различной степени готовности. На этой стадии может быть принято решение о целесообразности размещения на корабле, например, перспективного ракетного комплекса, обладающего необходимыми тактико-техническими характеристиками. Однако по мере продвижения процесса создания этого комплекса и корабля в целом приняты ранее характеристики начинают уточняться. Это уточнение идет своим закономерным путем, причем так, что те проблемы, которые встают перед разработчиком ракетного комплекса, разрешаются в интересах тех характеристик, которые с точки зрения разработчика являются наиболее существенными. Так, в случае необходимости преодоления некоторых возникающих трудностей в выполнении требований по таким ключевым характеристикам, как дальность стрельбы или скорость полета ракеты, разработчик скорее всего будет выходить из создавшегося положения за счет увеличения массогабаритных характеристик ракетного комплекса. В результате по мере завершения опытно-конструкторской работы по созданию образца его массогабаритные характеристики будут непрерывно расти. Это в значительной степени сдвигает интерес к новому боевому средству, который на ранних стадиях позволил принять положительное решение о его установке на корабле. Изменить же решение о составе вооружения корабля на поздних стадиях его создания будет затруднительно. Все это ставит перед исследователем прототипированным дополнительную задачу прогнозирова-

ния подобных ситуаций на как можно более ранних стадиях создания корабля.

Необходимость разработки математических моделей, объединяющих несколько областей знания или направленных на получение совокупной оценки корабля в целом, позволяет говорить о выделении этих моделей в отдельный класс, получивших название системных моделей анализа свойств корабля. Исходя из вышесказанного, основной задачей создания моделей этого класса должно стать получение ответа на поставленный вопрос о целесообразности реализации в перспективном проекте корабля (или семейства кораблей) предлагаемого технического решения применительно к той или другой его подсистеме.

Помимо этой главной задачи системного моделирования, можно выделить также ряд частных задач, в различной степени обеспечивающих решение главной задачи.

Среди них наиболее часто при исследовательском проектировании возникает задача определения рационального сочетания не широкой совокупности свойств проектируемого корабля, а ограниченного (двух-трех) количества свойств, критичных к некоторой актуальной проектной ситуации. Так, например, для современных надводных кораблей остро стоит вопрос о рациональном сочетании на них средств активной и пассивной защиты. Сложность электромагнитной обстановки на корабле в процессе ведения боя, большая степень неопределенности по количественным характеристикам противника и возможным способам применения им средств нападения, а также значительные массогабаритные характеристики устанавливаемых на корабль образцов оружия и вооружения — все это делает необходимым построение системной модели, позволяющей получить целостную картину происходящих явлений и сделать верный вывод о составе участвующих в этом процессе средств.

Нередко также возникает ситуация, когда концентрированное выражение проблематики создания перспективного корабля целиком укладывается в ограниченный круг ярко выраженных противоречий. Так, облик корабля с небольшим водоизмещением (корсет) в значительной степени проявляется после решения о размещении на нем корабельного вертолета.

Другой частной задачей системного моделирования является задача обоснования общих технических требований к проектируемому кораблю. Долгое время считалось, что эта задача вполне может быть решена внутри и средствами только предметных областей знания. Однако в современных условиях такая ситуация встречается крайне редко. Действительно, если необходимо обосновать требования к непотопляемости, то степень обеспеченности корабля этим свойством должна соотноситься по крайней мере со степенью обеспеченности такими свойствами, как взрыво- и пожаробезопасность, боевая прочность и живучесть технических средств. В противном случае может оказаться, что с точки зрения такого комплексного свойства корабля, как живучесть, объединяющего в себе все перечисленные частные свойства, проектируемый корабль будет несбалансирован, т. е. утрата им непотопляемости в бою будет наступать значительно позже, чем потеря, например, общей прочности.

Обоснование общих технических требований к свойствам надводных боевых кораблей не сводится только к задаче закрепления некоторых предельных значений контролируемых параметров, служащих количественной мерой нормируемых свойств конкретного корабля или даже класса кораблей. Общие технические требования выдвигаются ко всем боевым надводным кораблям и, значит, выполняют также методологическую задачу распределения степени обладания тем или иным свойством различными классами и типами надводных кораблей.

Наконец, важное место в системном моделировании занимает задача выяснения влияния одних частных свойств корабля на другие с целью более глубокого анализа связей этих свойств. Так, без построения модельных зависимостей и установления связей между акустическими характеристиками гребного вала и величиной помехи корабельной гидроакустической станции не могут быть определены те параметры акустического излучения, на которые должно быть в первую очередь обращено внимание разработчика гребного вала. Иногда эта задача определяется как задача установления роли и места рассматриваемого свойства в системе свойств корабля в целом. Примером такой трактовки задачи может служить определение соотношения на

корабле зенитных огневых средств и средств радиолокационной борьбы (РЭБ) (принимая нас также будет интересовать распределение между активными и пассивными средствами РЭБ). Для ее решения необходимо иметь системную модель отражения средств воздушного нападения противника, в результате исследования которой должен быть выяснен вклад каждого из рассматриваемых средств в общую задачу, решаемую кораблем. Одним из результатов такого моделирования может стать принятие решения о составе боевых средств на корабле.

Очевидно, есть и другие задачи системного моделирования, но те, о которых было упомянуто выше, являются сегодня наиболее актуальными.

## 2.1. ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМНЫХ МОДЕЛЕЙ ОЦЕНКИ СВОЙСТВ КОРАБЛЯ

Отличительной особенностью системных моделей является то, что они должны объединять результаты исследований, проводимых в нескольких предметных областях. Кроме того, при построении таких моделей не используются приемы и подходы, характерные для системных исследований вообще и не связанные с физической сущностью моделируемых явлений. Как уже отмечалось, конечной целью моделирования свойств корабля является обоснование принципиальных проектных решений или обоснование требований к проектируемым кораблям. С системной точки зрения эта задача может решаться как на основе модели анализа, так и на основе синтетических моделей. При этом под моделями анализа мы всегда понимаем такие модели, результатом работы которых является количественная оценка моделируемого свойства или функция, отражающая моделируемый процесс. Модель синтеза разрабатывается с целью получения математического образа предпочтительного в некотором смысле объекта или просто отвечающего выдвинутой системе требований и физическим законам, обеспечивающим его существование. Традиционно задачи синтеза относятся к основной задаче проектирования и рассматриваются в самостоятельном разделе этой дисциплины. Поэтому можно говорить о понимании процесса

системного моделирования в широком и узком смысле. Такой подход вполне отвечает философскому дуализму, свойственному системному анализу вообще, и поэтому в дальнейшем мы будем следовать принятому раздвоению. В соответствии с изложенным под задачей системного моделирования в узком смысле понимается задача анализа одного или нескольких связанных между собой свойств с целью получения их количественной оценки применительно к проектируемому кораблю. В широком смысле эта задача охватывает весь комплекс задач анализа и синтеза и разрешается в рамках задачи выбора предпочтительного варианта проекта корабля. В настоящем разделе мы будем рассматривать системное моделирование только в узком смысле. Иногда эту задачу называют также задачей оценки свойств.

В целом создание системных моделей оценки свойств корабля характеризуется следующими особенностями:

- ориентацией исследований на конечный результат, как правило, связанный с обоснованием проектного или технического решения;
- ограниченным и специальным образом оговоренным объемом входной информации;
- минимально необходимым уровнем содержательности модельных функций.

Рассмотрим эти особенности более подробно.

Ориентация выполняемых исследований на конечный результат вносит жесткую организацию в иерархическую структуру модели. Эта жесткость обуславливается, во-первых, тем, что в результате работы всего модельного комплекса должен быть получен конкретный результат в виде числовой оценки — значения показателя свойства, анализ которого выполняется в процессе данного исследования (в некоторых случаях в качестве результата такого исследования может выступать и функция, построенная при каком-либо одном значении фиксированного параметра). Описанная постановка задачи делает необходимым наделить весь комплекс моделей на получение жадимой оценки. Другим обстоятельством, предопределяющим структуру модельного комплекса, является то, что сами модельные функции, отражающие те или иные свойства корабля, детали не только

адекватно воссоздавать особенности наблюдаемых процессов, связанных с проявлением моделируемых свойств, но и быть построены таким образом, чтобы в качестве аргументов использовать показатели других свойств, и сами должны выступать в этом качестве. Так, например, при необходимости выполнить оценку боевой устойчивости корабля при воздействии средств воздушного нападения (СВН) в качестве показателя этого свойства может быть принята вероятность уничтожения корабля при решении этой задачи. Для получения такой оценки понадобится выдвинуть комплекс свойств, обеспечивающих способность корабля противостоять воздействию СВН, и построить соответствующую комплекс моделей. При этом определение круга свойств, влияющих на получение результирующей оценки, основывается только на глубоком понимании исследователем сущности моделируемого явления и той степени адекватности, которая должна быть достигнута. В нашем примере в качестве моделируемых свойств могли бы выступать быстродействие зенитных огневых средств (ЗОС) корабля и их поражающий потенциал по каждой податакующей цели, возможности корабля по обнаружению СВН и целераспределению по ним ЗОС, качка корабля, его архитектурные особенности, электромагнитная обстановка и способность корабля осуществлять радиоэлектронное противодействие (РЭП), эффективность боевого управления и уровень боеготовности экипажа, живучесть, скрытность по физическим полям, маневренность и т. п. Каждое из этих свойств вносит свой вклад в способность корабля противостоять СВН противника. При этом избыточность или недостаточность учета перечисленных факторов определяется долей этого вклада, которая может быть оценена только по результатам анализа всего комплекса моделей на чувствительность итоговой оценки к изменению показателей частных свойств.

Поскольку процесс боевого сопряжения носит сугубо случайный характер, степень проявления каждого из моделируемых свойств также будет случайной. При этом случайные события, характеризующие свойства, могут быть независимыми или зависимыми. В первом случае модель, получающая финальную оценку хорошо представляется марковской цепью, отвечающей

сценарно винда боевого применения корабля. Так, в рассматриваемом примере если считать, что факты обнаружения СВН и их поражения являются независимыми случайными событиями, то вероятность того, что каждое СВН будет обнаружено и уничтожено, может быть определена по выражению

$$P_n = P_{об}P_{ин}. \quad (5.1)$$

В том случае, если предположение о независимости не соответствует действительности, необходимо формировать модельную функцию на основе более содержательных в финансовом смысле зависимостей. Так, связь между скорострельностью и способностью к перенацеливанию зенитно-ракетного комплекса (ЗРК) и его эффективностью поражения СВН может быть определена путем поинтервального интегрирования циклограмм боевого использования комплекса на всем протяжении времени полета СВН.

Рассмотрение вопроса о входной информации можно начать с замечания о том, что, как правило, фрагменты модельных функций, разрабатываемые в предметных областях, носят характер задач, отражающих наблюдаемую последовательность окружающей природу. Это связано с тем, что при исследовании того или иного предмета или явления изначально ставится задача установления закономерной связи между значимыми факторами, влияющими на протекание наблюдаемого процесса, и контролируемым (измеряемым) параметром. При этом первые выступают в модели как аргументы, а вторые как функции. Такая картина характерна тогда, когда объект исследования существует и о нем может быть получена практически неограниченная по объему информация. При оценке свойств проектируемого корабля, и особенно на ранних этапах, когда идет формирование требований, возможности получения входной информации существенно ограничены. Кроме того, жесткая ориентация структуры модели, о которой уже говорилось, требует рассмотрения в качестве аргументов и функций модели не любых, а вполне определенных переменных. Так, при оценке несущей способности корпусных конструкций корабля модель должна быть построена таким образом, чтобы в качестве ее входной информа-

ции выступали главные размерения корабля, количество палубных перекрытий, главных водонепроницаемых переборок и т. п. Но нет оснований на ранних стадиях проектирования рассчитывать на такие данные, как высота полка поперечного набора, шагца между продольными ребрами жесткости и др. Иногда удается подразумевать часть данных такого типа, имея ввиду, что они будут отвечать конструктивным или нормирующим требованиям. Однако так бывает далеко не всегда.

Примером влияния структуры моделей свойств на структуру исходных данных этих моделей может служить задача оценки влияния мощности главной энергетической установки (ГЭУ) корабля, гидродинамической помехи и акустического поля гребного винта на условия работы гидроакустического комплекса (ГАК). Как известно, это влияние реализуется через характеристику помехи ГАК. Поэтому, например, акустическая модель гребного винта не может быть ориентирована на получение в качестве выходной информации спектра подводного шума значений критических скоростей или других параметров, а только той характеристики, которая присутствует в качестве аргумента в модели ГАК. Так, в уравнении для определения энергетической дальности обнаружения ГАК присутствует такой параметр, как дальность помехи  $R_p$ :

$$R^2 = \frac{P_s}{P_0} \cdot \frac{K_0}{2} \cdot 10^{-0,1R} \cdot \frac{1}{\delta}. \quad (5.2)$$

где  $R$  — энергетическая дальность обнаружения (по сферическому закону),  $P_0$  — звуковое давление на оси антенны ГАК,  $K_0$  — радиус эквивалентной сферы,  $\beta$  — характеристика пространственного затухания звука в воде.

Для режима эквивалентности

$$\delta = \frac{\sqrt{2} \cdot K_0}{\Delta f \cdot \tau}$$

где  $K_0$  — отношение сигнал/помехи на индикаторе,  $\Delta f$  — полоса пропускания приемного тракта ГАК,  $\tau$  — время усреднения сигнала.

В свою очередь, выражение для давления помех от винта  $P_0$ , которое может быть определено как линейная составляющая общего давления помех

$$P_0^2 = P_1^2 + \dots, \quad (5.3)$$

должно иметь следующий вид:

$$P_0 = P(WPS, N, v, \dots), \quad (5.4)$$

где  $WPS$  — мощность ГЭУ корабля,  $N$  — неравномерность потока в диске винта,  $v$  — скорость хода корабля.

Из приведенного примера ясно видно, что при переходе от выражения (5.2) к выражению (5.3) и затем (5.4) могут быть использованы вполне определенные параметры моделируемых свойств, возможно, даже не самые характерные, но позволяющие решить поставленную на исследование задачу.

Наконец, последний вопрос из тех, которые были сформулированы выше. Это вопрос о минимально необходимом уровне содержательности модельных функций. Понятно, что с ростом количества элементов модельного комплекса время, необходимое для расчета каждой из модельных функций элементов, будет сокращаться. В конце концов при достаточно большом числе элементов и некоторой заданной мощности вычислительных средств возникнет ситуация, когда в выделенном для некоторого элемента объеме уже не удастся разработать модель без серьезного ущерба для ее адекватности. При этом, если упрощение модели становится недопустимым с точки зрения результатов исследования, то необходимо пересмотреть постановку задачи и структуру модельного комплекса. Таким образом, вопрос о допустимости вводимых упрощений или, иначе говоря, минимальной содержательности модели диалектически связан с конечными целями исследования. При этом моделирование элемента может осуществляться на двух уровнях: регрессионном и физическом. В свою очередь, регрессионные модели могут быть также двух типов — статистические и с физической структурой. Первые образуются путем равномерного покрытия генеральной совокупности статистической выборки. В такого рода модели не вкладывается какой-либо физический смысл. Они

хорошо воспроизводят моделируемое свойство в интерполяционном диапазоне, но дают большие ошибки при экстраполяции. Для того чтобы придать регрессионным моделям большую адекватность за пределами статистической выборки, в них вводят дополнительную математическую структуру, представляющую собой некоторую гипотезу или теоретическое основание процесса или явления. Так, модель массы корпуса корабля может быть определена методами регрессионного анализа в виде [113]

$$P_{01} = A_0 D + A_1 L + A_2 B + A_3 H + A_4 LB + \dots, \quad (5.5)$$

где  $L$ ,  $B$  — длина и ширина корабля по конструктивную ватерлинию;  $H$  — высота борта корабля;  $D$  — нормальное водоизмещение корабля;  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  и  $A_4$  — статистические коэффициенты.

Иная модель может быть построена на основе введения представления корпуса корабля в виде балки с размерами  $LBH$ , свободно опертой в оконечностях и нагруженной силой  $D$ . Тогда масса корпуса может быть определена из выражения:

$$P_{01} = Q_{01} DLH, \quad (5.6)$$

где  $Q_{01}$  — статистический коэффициент.

При наиболее полной реализации гипотезы о сущности процесса или явления модель переходит на физический уровень. Разумеется, в этом случае содержательность модели возрастает.

Важное место при определении уровня содержательности модели занимает вопрос о парности противодействующих факторов. Как в какой-либо балочной системе, к которой мы относим корабль, так и в каждой его подсистеме действуют противодействующие факторы. Если единичные уровни содержательности фактора приносят дисбаланс в модель и, следовательно, значительные ошибки. В этом смысле чисто регрессионные модели предпочтительнее, так как противоречия, заложенные в систему или подсистему, при статистической обработке балансируются автоматически. Иными словами, с помощью более простых и очевидных гипотез легче всего обесценить устойчивость системных моделей. Стремление поднять уровень содержательности и

стает усложнения физической компоненты иногда дает отрицательный результат, если удается смоделировать только один какой-либо фактор без учета его контрфактора. Так, в нашем примере выражение (3.6) учитывает теорию упругого изгиба, но не учитывает тот фактор, что толщины бортовых листов не могут быть меньше некоторых наперед заданных эксплуатационных величин. Поэтому при попытке определить высоту борта корабля по выражению (3.6) мы получим существенно заниженный результат при недопустимо малых толщинах бортовых листов. В этом случае поставленной задачей в большей степени отвечает более простая гипотеза, которой соответствует формула так называемого "кубического модуля" [286]:

$$P_{03} = q_{03} L B H, \quad (5.7)$$

где  $q_{03}$  — статистический коэффициент.

При необходимости создать все же более развитую модель следует воспользоваться выражением, которое помимо (3.6) учитывало бы также и эксплуатационные требования к корпусу корабля.

Помимо описанных выше особенностей на характер системных моделей большое влияние оказывают также структурное представление и информационное обеспечение.

Как было уже указано в параграфе 1.2, в системном анализе приняты три основных структурных представления моделей: стратификация, иерархирование и разбиение на уровни. При этом под стратифицированной понимается такой принцип декомпозиции системы, когда каждый элемент (подсистема) модели представляет собой саму систему, рассматриваемую на новом уровне абстрагирования. С содержательной точки зрения это означает, что стратифицированный элемент формируется как целостный объект моделирования, но рассматриваемый под частным, специальным углом зрения. Тогда если целостная оценка системы характеризует качество объекта исследования, которое представляет собой полную совокупность его свойств, то любая частная оценка соответствует определенному частному свойству этого объекта. Из сказанного следует, что структурно математические модели анализа свойств корабля представляют собой стратифицированные модели, т. е. предполагают органи-

зованно по стратам. При этом в каждом элементе стратифицированной структуры осуществляется моделирование только какого-либо одного свойства, описываемого в терминах специальной предметной области.

Информационное обеспечение системных моделей во многом определяется тем, что по вертикали построение модели направлено на получение интегральной оценки по совокупности моделируемых свойств. При этом всегда предполагается, что оценка более высокого уровня получается как функция, аргументами которой выступают оценки (показатели) свойств, модельные фрагменты которых расположены на нижних уровнях. В данном случае понятия свойств нижнего, всех промежуточных и самого верхнего уровней носят не только обратный, но и самостоятельный содержательный характер. Например, если на нижнем уровне иерархии рассматриваются два таких свойства корабля, как плавучесть и остойчивость, то на верхнем уровне показатели этих свойств могут определять оценку такого свойства, как непотопляемость. При этом само понятие свойства непотопляемости может быть определено самостоятельно и гораздо шире, чем получается как простое сочетание показателей остойчивости и плавучести. Такое модельное представление позволяет избежать основного методологического противоречия системного анализа, заключающегося в том, что каждое свойство объекта как качественная категория может быть адекватно описано только бесконечным числом количественных параметров. Очевидно, что построение не только бесконечномерной, но и достаточно большой размерности модельной функции неконструктивно. Чтобы оценка, которая вкладывается в модель при формировании оценки свойства на базе ограниченного числа показателей входящих в него свойств нижнего уровня, не накапливалась снизу вверх, необходимо, чтобы эта оценка несла также самостоятельную смысловую нагрузку количественного отражения качества моделируемого свойства по его определению.

Довольно часто на систему моделей свойства вкладывают дополнительные структурные деления. Например, рассматривают боевые и эксплуатационные свойства корабля. Такое пред-



ставление оказывается достаточно эффективным только тогда, когда рассматриваемые свойства удается однозначно разделить по вновь вводимому признаку.

Организация связей между моделями тесно связана с вопросом формирования входной информации, поскольку для каждого элемента структуры модельного комплекса функции связи от соседних элементов структуры представляют собой особый вид входной (выходной) информации. Основными ответами ее от входной информации в общем виде являются проблема создания так называемых гибридных зависимостей и необходимость в отдельных случаях организации итерационных процедур для выработки необходимой информации. Гибридные связи возникают практически всегда при достаточно эффективном стратифицировании структуры. Это связано с тем, что стратификация по определению предполагает выделение в самостоятельный элемент аспекта видения системы под углом зрения определенного дисциплинарного направления. Так, при оценке безопасности и надежности посадки летательных аппаратов на корабль каждый структурный элемент модели может быть представлен своим итерационным однокорпусом при посадке, формирующимся на определенной, отличной от других элементов физической основе. Тогда интегральная оценка надежности посадки летательных аппаратов на корабль потребует создания таких модельных зависимостей, которые бы позволили в единых терминах представлять количественную меру всех составляющих качественных аспектов этого процесса. Так как каждая из моделей разрабатывается в терминах своих дисциплин (качка, аэродинамика, теория управления летательными аппаратами и др.), то модели оценки будут носить междисциплинарный (гибридный) характер, о чем и идет речь.

Необходимость в итерационных процедурах при организации связей между моделями возникает тогда, когда в паре элементов, связанных между собой, возникает потребность в получении взаимной информации не последовательно, а одновременно. С математической точки зрения такая ситуация эквивалентна решению системы уравнений, составленных из модельных функций элементов. Эта задача реализуется тогда, когда на

модельные функции накладываются какие-либо ограничения и они могут быть записаны в виде равенств или неравенств. В простейшем случае наиболее известным примером такой задачи является определение главных элементов корабля на основе совместного решения уравнений масс и вместимости. Однако это уже задача синтеза, а не анализа. При анализе свойств такие задачи носят более специфический характер.

### 5.3. РЕДУЦИРОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Изложенные в предыдущем параграфе учебника особенности системного моделирования находят свое выражение в таких основополагающих понятиях, как редуцирование, адаптация и агрегирование. Между этими понятиями и рассмотренными выше особенностями построения системных моделей очевидна связь нет однозначного соответствия. Это одна традиция аспектов системного моделирования. Она распространяется не только на модели анализа, но и на модели синтеза. Однако применительно к моделям оценки свойств эти понятия раскрываются со спецификой, обусловленной как раз теми особенностями, о которых говорилось в предыдущем параграфе.

Помимо упомянутых особенностей системного моделирования перед рассмотрением введенных понятий необходимо указать еще на два важных вопроса: проблемное ориентирование модельного комплекса и адекватность системных моделей. Проблемы адекватности системных моделей были подробно рассмотрены в параграфе 1.5. Что же касается проблемного ориентирования, то этот вопрос возникает на самом высоком уровне методологии моделирования. Поскольку под моделью (в данном случае — математической) мы всегда понимаем некоторый образ исследуемого объекта или явления без несущественных особенностей, то при этом обязательно возникает проблема разделения аспектов моделирования на существующие и несуществующие. Считается, что методологически правильно такое разделение производить исходя из интересов исследования. Тогда те аспекты, которые, по нашему мнению, могут повлиять на инте-

ресующие нас результаты исследования, мы будем относить к существенным, а остальные — к несущественным. В этом смысле и принято говорить о проблемно-ориентированном моделировании, т. е. о таких моделях, один аспект которых находят более адекватное отражение, чем другие, в зависимости от проблемной ориентации предполагаемых исследований.

Применительно к рассматриваемым здесь приемам редуцирования, адаптации и агрегирования о проблемной ориентации можно говорить как о неравномерности глубины проработки по отношению ко всем объединяемым в системном комплексе моделям. С точки зрения общей методологии описанная неравномерность имеет информационную интерпретацию в виде так называемого "оболочечного" представления модели (см. п. 1.2). Оболочечная интерпретация предполагает наличие у модели "интеллектуального ядра", расположенного в центре структуры и содержащего в наибольшей степени разработанные модельные фрагменты. Последние иногда называют моделями, глубоко погруженными в предметную область. Затем по направлению к периферии модели располагается слой моделей информационной поддержки, к которому на внешней границе модельного комплекса примыкают модели, обеспечивающие замыкание составляющих элементов в единую систему. Эта система как целое погружена в среду, находящуюся по отношению к модели в устойчивом диалектическом противоречии и обеспечивающую ее необходимой исходной информацией. Таким образом, если цели предполагаемого исследования в основном обеспечиваются моделями ядра, то на модели информационной поддержки возлагается некоторая вспомогательная функция аддитивного типа, о которой будет сказано ниже. Вместе с тем моделей и первого, и второго типов еще недостаточно для построения целостного образа системы, эту функцию выполняют модели замыкания, что обеспечивает процесс агрегирования. Для наглядности оболочечное представление модели изображено на рис. 1.7. Далее при раскрытии вводимых понятий редуцирования, адаптации и агрегирования мы будем давать им также интерпретацию в терминах проблемно-ориентированных моделей.

### Проблема редуцирования моделей предметной области

Под редуцированием в системном моделировании понимается процесс снижения размерности и трудоемкости вычисления (по счетному времени и машинной памяти) включаемой в сложную системную модель модельной функции, созданной ранее в рамках предметной области. Этот процесс реализуется посредством одновременного приема, занимающего центральное место в инструментарии разработки системных моделей анализа. Редуцирование как результат приложения системных средств к моделям предметных областей является следствием не одной, а по меньшей мере трех основных причин. Первая и наиболее очевидная из них состоит в том, что при комплексном рассмотрении некоторой актуальной проблемы средствами системного анализа необходимо в рамках одной задачи объединить две и более моделей предметных областей. Если предположить, что разработка как всех моделей предметной области, так и объединяющей их системной модели осуществляется на вычислительной технике сравнимого уровня разработчиками примерно одного класса (какое-либо иное предположение противоречиво бы здравому смыслу), то очевидно, что модели предметных областей прежде, чем они будут включены в системную модель, должны быть упрощены в зависимости от того, сколько их участвует в системной задаче. С точки зрения проблемной ориентации модели такое упрощение должно проходить неравномерно. Так, ядро модели будет составлять в наименьшей степени редуцированные фрагменты, содержание которых в наибольшей степени отвечает целям исследования. В наибольшей степени редуцирование затронет модели замыкания.

Вторая причина редуцирования состоит в том, что на этапе исследовательского проектирования в распоряжении исследователя находится ограниченное количество информации о корабле. Как правило, это только главные элементы проекта и, может быть, еще некоторые дополнительные данные. В то же время модели, разработанные в той или иной предметной области и привлекаемые в системную модель, используют гораздо более полную информацию об объекте исследования или наблюдаемом явлении, т. е. о корабле. Из методологии моделиро-

вания известно, что объединение входной информации ведет к упрощению модели и, следовательно, к редуцированию.

Наконец третья и последняя причина редуцирования заключается в необходимости балансирования модельного комплекса в интересах целей исследования. Процесс балансирования является обратной стороной проблемной ориентации модели. Определив принадлежность фрагмента модели к тому или иному структурному слою оболочечной модели, мы тем самым делаем необходимым приведение уровня сложности (глубины проработанности) этого фрагмента к общему уровню сложности всех фрагментов данного слоя. Учитывая, что усложнения глубины проработки моделей предметной области при системном моделировании не предполагается, достичь указанной цели можно только путем редуцирования "перегруженных" с описанной точки зрения фрагментов.

Сформулированные выше аспекты редуцирования рассмотрены на примере моделирования такого свойства проектируемого корабля, как ходкость. Прежде чем приступить к описанию этого примера отметим, что на каждой системной модели может быть продемонстрирована реализация всех выделенных выше понятий, однако для ясности изложения здесь и в дальнейшем анализ предлагаемых примеров будет проводиться применительно только к тем понятиям, иллюстрация которых предполагается.

Моделирование ходкости на начальных стадиях проектирования обычно сводится к определению потребной мощности главных механизмов на полном и экономичном ходу корабля, а также запаса топлива для главной энергетической установки на полную дальность плавания. Зная величину полного сопротивления корпуса корабля  $R$  (кг) при его движении с заданной скоростью  $v$  (м/с), можно определить эффективную, или буксировочную мощность  $EPS$  (д. с., кВт), которая затрачивается на преодоление указанного сопротивления:

$$EPS = Rv^{75}, \text{ д. с.} \quad (5.8)$$

В теории проектирования корабля в основном используется валовая мощность  $WPS$  (мощность, подводимая к гребному винту) и собственная мощность двигателей  $M_s$  (мощность на

фланцах всех двигателей главной энергетической установки), которые связаны между собой и с  $EPS$  зависимостями:

$$WPS = EPS\eta_p, \quad M_s = WPS(\eta_p, \eta_d) \quad (5.9)$$

или

$$M_s = EPS(\eta_p, \eta_b, \eta_d), \quad (5.10)$$

где  $\eta_p$  — пропульсивный коэффициент, учитывающий потери мощности в гребном винте, работающем за корпусом;  $\eta_b$  — КПД валопровода;  $\eta_d$  — КПД передачи (редуктора и т. д.).

Определение потребной мощности корабля в рамках предметной области предполагает наличие частичного подобия теоретического чертежа проекта чертежу некоторого его прототипа (или обобщенному теоретическому чертежу семейства прототипов). В дальнейшем для простоты будет упоминаться только один прототип. Если для данного теоретического чертежа прототипа имеются результаты буксировочных испытаний модели, то, внося в этот теоретический чертеж некоторые вноски определенных изменений применительно к проектируемому кораблю, можно получить для него величину сопротивления движению корпуса в воде. Рассмотрим порядок расчета в этом случае.

Из выражений (5.8) и (5.9) следует

$$WPS = Rv^{75}\eta_p, \text{ д. с.} \quad (5.11)$$

(В системе СИ:  $WPS/1.36$ , д. с. =  $WPS$  кВт).

Полное сопротивление может быть представлено в виде

$$R = \zeta \rho v^2 \Omega / 2, \quad (5.12)$$

где  $\zeta$  — коэффициент полного сопротивления;  $\rho$  — массовая плотность воды, принимаемая  $102 \text{ кг}\cdot\text{с}^3/\text{м}^4$ ;  $\Omega$  — площадь смоченной поверхности,  $\text{м}^2$ ;  $v$  — скорость полного хода, уз.

Используя формулы (5.11) и (5.12), можно получить:

$$WPS = \zeta v^5 \Omega / (10.8\eta_p), \quad (5.13)$$

Из выражения (5.13) следует, что для определения валовой мощности механизмов при заданных скорости и водоизмещении,

необходимо знать величину смоченной поверхности  $\Omega$ , пропульсивного коэффициента  $\eta_p$  и коэффициента полного сопротивления  $\zeta$ .

Величина смоченной поверхности определяется как площадь погруженной части корпуса, описываемого теоретическим чертёжом проекта. Учитывая, что между проектом и прототипом существует во всяком случае частичное подобие, эта величина могла бы быть получена численным путем. Однако такое решение, безусловно, пережжено бы модель по сравнению с другими ее фрагментами, не обеспечив сколько-нибудь заметного ее уточнения. Поэтому при проектных расчетах обычно прибегают к гораздо более простым (и грубым) зависимостям, связывающим величину смоченной поверхности с главными элементами проекта напрямую. Такие зависимости являются редуцированными, порожденными второй из ранее описанных причин, и неоднократно предлагались различными авторами. Так, известны формулы Сенска, Фруда, Ольстена и т. д. [254]. Наиболее же часто в военном кораблестроении используется формула Дени—Мумфорда [254]

$$\Omega = L(1.36T + 1.136B), \quad (5.14)$$

Здесь  $L$  — длина корабля;  $B$  — ширина корабля;  $T$  — осадка корабля;  $\delta$  — коэффициент общей полноты корабля (все по КВЛ).

Величина пропульсивного коэффициента  $\eta_p$  принимается или непосредственно по данным прототипа, или определяется по прототипу при равной относительной скорости. В последнем случае, кроме кривой буксировочных испытаний, необходимо иметь кривую самоходных испытаний корабля или модели. Для обычных военных кораблей величина  $\eta_p$  колеблется в пределах 0,50—0,60.

Коэффициент полного сопротивления является суммой частных коэффициентов сопротивления:

$$\zeta = \zeta_{\text{тр}} + \zeta_{\text{об}} + \zeta_{\text{м}} + \zeta_{\text{п}} + \zeta_{\text{л}} + \zeta_{\text{дв}}, \quad (5.15)$$

где  $\zeta_{\text{тр}}$  — коэффициент сопротивления трения смоченной поверхности;  $\zeta_{\text{об}}$  — коэффициент сопротивления формы обводов

корпуса;  $\zeta_{\text{м}}$  — коэффициент волнового сопротивления, вызванного образованием волн на поверхности воды при движении корабля;  $\zeta_{\text{п}}$  — коэффициент сопротивления выступающих частей;  $\zeta_{\text{л}}$  — коэффициент воздушного сопротивления корпуса;  $\zeta_{\text{дв}}$  — коэффициент дополнительного сопротивления при плавании на взволнованной поверхности моря.

Для обычных типов военных кораблей воздушным сопротивлением можно пренебречь. Дополнительное сопротивление, вызванное волнением, рассматривается только в специальных задачах, связанных, например, с определением средней ожидаемой дальности плавания корабля при различных погодных условиях.

Коэффициент сопротивления выступающих частей для надводных военных кораблей определяется как сумма коэффициентов сопротивления характерных выступающих частей, значения которых известны по результатам ранее проведенных испытаний. К таким выступающим частям относятся патрубки системы охлаждения энергетической установки, рубль, скуловые килы, крошительны линии гребных валов и т. п. Таким образом, например, для двухвалных кораблей значение  $\zeta_{\text{м}}$  составляет около  $0,80 \cdot 10^{-3}$ .

Сопротивление трения можно рассматривать как сопротивление технически гладкой пластины, смоченная поверхность которой равна смоченной поверхности корабля, с некоторой надбавкой на шероховатость:

$$\zeta_{\text{тр}} = \zeta_{\text{Фр}} + \zeta_{\text{ш}}. \quad (5.16)$$

Коэффициент трения пластины может быть найден по формуле Пристля—Швантига в функции от числа Рейнольдса:

$$\zeta_{\text{Фр}} = 0,455(\text{Lg}(\text{Re}))^{-2,58}, \quad (5.17)$$

где  $\text{Re} = vL/\nu$  — число Рейнольдса;  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости, принимаемый обычно при температуре  $t = +5^\circ\text{C}$  равным  $1,57 \cdot 10^{-6}$ .

Надбавка на шероховатость  $\zeta_{\text{шор}}$  принимается как некоторая не зависящая от числа Рейнольдса величина в зависимости от типа корабля и характера шероховатости обшивки. Обычно этот коэффициент принимает значения в пределах  $(0,30—0,50)10^{-4}$ .

Коэффициент сопротивления формы и коэффициент волнового сопротивления в сумме составляют коэффициент остаточного сопротивления

$$\zeta_{\text{ост}} = \zeta_{\text{фр}} + \zeta_{\text{шор}}. \quad (5.18)$$

Величина остаточного сопротивления пересчитывается по данным буксировочных испытаний модели выбранного теоретического чертежа прототипа. При этом обычно предполагается, что значения относительных характеристик модели, влияющих на величину остаточного сопротивления, не зависят друг от друга. Исходя из этого предположения, значение коэффициента остаточного сопротивления проектируемого корабля может быть определено по выражению

$$\zeta_{\text{ост}} = \zeta_{\text{остм}} \sum_i k_i, \quad (5.19)$$

где  $\zeta_{\text{остм}}$  — коэффициент остаточного сопротивления прототипа;  $k_i$  — коэффициент влияния на остаточное сопротивление изменения  $i$ -й относительной характеристики.

Для определения величин  $k_i$  используются графики, построенные для различных типов Фруда и обобщающие систематические модельные испытания, проводимые по различным методикам. Наиболее часто при проектировании военных кораблей используются графики, предложенные Гиртом и Муртингом [286].

Некоторо иной подход к определению остаточного сопротивления предлагается по графикам Тойлора [286]. В соответствии с этим подходом вычисляется непосредственное определение удельного остаточного сопротивления  $r = R_{\text{ост}}/D$  ( $D$  — водоизмещение корабля) как функции от относительных характеристик модели.

Как можно было видеть из изложенного, при использовании графиков для пересчета с прототипа необходимо иметь не толь-

ко данные результатов систематических испытаний модели в бассейне и характеристика прототипа, но и достаточно большой объем информации о самом проектируемом корабле. Кроме того, предлагаемые алгоритмы определения буксировочной мощности на основе графиков трудоемки и требуют значительных объемов памяти ЭВМ. Все это делает необходимым на стадии исследовательского проектирования выполнять редуцирование описанных моделей. Первым шагом в этом направлении является попытка отказаться от представления в модели составляющих сопротивления движению корабля и заменить их одной общей величиной. Такой подход реализован в методе Э. Палмела. Этот метод предполагает определение с помощью графиков не составляющих коэффициента остаточного сопротивления, а общего (адмиралтейского) коэффициента  $C_p$ , позволяющего непосредственно связать величину буксировочной мощности с водоизмещением и скоростью полного хода корабля. При этом формула Палмела имеет вид

$$EPS = \frac{Dx}{L\lambda} \sqrt{\psi} \frac{v'}{C_p}, \quad (5.20)$$

где  $\lambda$  — поправочный коэффициент на длину;  $x$  — коэффициент, зависящий от числа валов и учитывающий влияние выступающих частей;  $\psi$  — коэффициент продольной остроты корпус (следует отличать от коэффициентов продольной и вертикальной полноты);  $C_p$  — коэффициент, определяемый по диаграмме Палмела в зависимости от величины  $\psi$  и относительной скорости

$$v' = v\sqrt{\psi}/L.$$

Коэффициенты  $\lambda$ ,  $\psi$  и  $x$  определяются выражениями:

$$\lambda = 0,7 + 0,3\sqrt{L/100} \quad \text{при } L < 100;$$

$$\lambda = 1 \quad \text{при } L \geq 100;$$

$$\psi = 105(L/B)^{-1};$$

$$x = [1,000 \quad 1,100] \quad \text{при числе винтов } 1-4.$$

Графики для определения коэффициента  $C_p$  приведены на рис. 5.1. Наиболее полная редукция модели будет реализована,

когда становится возможным вообще отказаться от обращения к графикам. Именно такой подход и используется на самых ранних стадиях проектирования в виде так называемого метода адмиралтейских коэффициентов. В соответствии с этим методом определение валовой мощности механизмов осуществляется по следующей формуле:

$$WPS = D^{0.75} v_0^3 / C, \quad (5.21)$$

где  $C$  — адмиралтейский коэффициент.

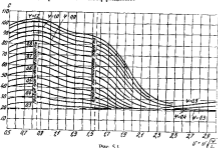


Рис. 5.1

Если мощность измеряется в л. с., то адмиралтейский коэффициент имеет размерность  $\text{т}^{0.75} \text{уз}^3/\text{л. с.}$  при условии, что водоизмещение принято в тоннах, а скорость в узлах.

Наиболее простая и типичная системная модель образуется при рассмотрении задачи определения запасов топлива или дальности плавания корабля. Эта задача может быть сформулирована следующим образом. Пусть боевой корабль (соединение кораблей) осуществляет боевую деятельность в заданной оперативной зоне в течение времени  $T_{\text{оп}}$ . Обеспечение топливом в этой зоне предполагается за счет танкерского флота таким обра-

зом, что по мере расхода топлива боевыми кораблями его доставка в объеме запаса топлива корабля  $Q_{\text{зап}}$  осуществляется с затратами  $C_{\text{зап}}$ . Тогда затраты на доставку топлива оперативному соединению за все время проведения операции составят:

$$S_{\text{зап}} = C_{\text{зап}} N_c T_{\text{оп}}, \quad (5.22)$$

где  $N_c$  — число кораблей в соединении (для простоты считается, что соединение состоит из кораблей одного проекта);  $n_{\text{зап}}$  — количество заливок (ходов танкеров) кораблей соединения за время  $T_{\text{оп}}$ .

Количество заливок кораблей определяется из выражения:

$$n_{\text{зап}} = T_{\text{оп}} / A, \quad (5.23)$$

где  $A$  — автономность каждого корабля по дальности плавания в сутках.

Теперь для определения величин  $A$  и  $Q_{\text{зап}}$  потребуется подключить ранее рассмотренной модели определения валовой мощности корабля при заданной (средней ожидаемой) скорости хода. Из выражений (5.22) и (5.23) можно видеть, что для того, чтобы системная модель получилась сбалансированной по входным и ее частным фрагментам из предыдущей задачи может быть использовано только выражение (5.21), т. е. наиболее мощная ее редукция. В этом случае выражения для определения величин  $A$  и  $Q_{\text{зап}}$  могут быть записаны следующим образом:

$$A = R/v_0, \quad (5.24)$$

где  $R$  — дальность плавания корабля в милях;

$$Q_{\text{зап}} = q W P S A, \quad (5.25)$$

где  $q$  — удельный расход топлива энергетической установкой корабля, т/л, с. час.

Если считать, что затраты на хранение 1 т топлива на корабле составляет  $C_{\text{хр}}$ , то общие затраты на обеспечение топливом соединения определяются из выражения:

$$S_{\text{об}} = S_{\text{зап}} + C_{\text{хр}} N_c Q_{\text{зап}} \quad (5.26)$$

или

$$S_{\text{об}} = N_d(C_{\text{об}}T_{\text{об}}qWPS/Q_{\text{об}} + C_{\text{пр}}Q_{\text{об}}). \quad (5.27)$$

При этом минимальные затраты на обеспечение соединения топливом могут быть найдены из равенства нулю первой производной выражения (5.27). Тогда оптимальный запас топлива на каждом корабле соединения будет определяться из выражения

$$Q_{\text{об оп}} = (C_{\text{об}}T_{\text{об}}qWPS/C_{\text{пр}})^{0.5}, \quad (5.28)$$

а оптимальная дальность плавания каждого корабля из выражения

$$R_{\text{об}} = Q_{\text{об оп}} C/(qD^{0.5}V^2). \quad (5.29)$$

В приведенном примере можно увидеть все три причины редукции моделей предметной области. Здесь и необходимость объединения нескольких моделей, и редукция по независимым переменным, и, наконец, редукция, обусловленная балансированием всех модельных фрагментов, входящих в модельный комплекс.

#### 5.4. АДАПТАЦИЯ МОДЕЛЬНЫХ ФРАГМЕНТОВ И АГРЕГИРОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ АНАЛИЗА СВОЙСТВ КОРАБЛЯ

Под адаптацией при системном моделировании мы понимаем процесс изменения разработанной в предметной области исходной модели с целью ее согласования по входной и выходной информации со всеми моделями, входящими в системный комплекс. Следует различать адаптацию моделей по горизонтальным и вертикальным связям иерархической структуры комплекса. Необходимость адаптации горизонтальных связей обусловлена требованиями согласования частных моделей одного уровня. Как уже отмечалось в предыдущем параграфе, эти связи обычно носят гибридный характер. При этом передача информации от одного фрагмента системной модели к другому может осуществляться последовательно или параллельно. С точки зрения процесса адаптации последовательная передача информации между одноуровневыми моделями осуществляется так же, как и при адаптации вертикальных связей. Разница будет заклю-

читься только в том, что в отличие от адаптации горизонтальных связей при организации вертикальных связей основное внимание должно быть обращено на выполнение требований, предъявляемых фрагментами модели, расположенными на более высоком уровне, к виду переменных, передаваемых от нижерасположенных модельных фрагментов.

Параллельная передача информации на одном иерархическом уровне математически реализуется путем решения системы уравнений, число неизвестных которых равно числу взаимно передаваемых параметров модельных фрагментов. Как уже отмечалось, для системных моделей анализа этот тип передачи информации не является характерным. Довольно часто встречается задача с параллельной передачей информации в рамках одной предметной области. Так, например, хорошо известны задачи строительной механики корабля по расчету многополетных балок. Раскрытие их статической неопределимости может быть выполнено по схеме теоремы трех или пяти моментов или иным способом. С математической точки зрения решение этих задач сводится к составлению и последующему решению системы алгебраических уравнений, что может быть интерпретировано как параллельный обмен информацией. Но поскольку при этом рассматривается только одна предметная область, говорить об адаптации системной модели применительно к таким задачам нет оснований.

Примеры адаптации при последовательной передаче информации достаточно просты и не нуждаются в каком-либо отдельном рассмотрении. Важно помнить только то, что этот тип адаптации всегда сопровождается или редукцией входящих в системную задачу моделей, о которой говорилось в предыдущем параграфе (например, выражения (5.21) и (5.25)), или агрегированием модели (последнее имеет место при адаптации вертикальных связей), о чем пойдет речь несколько позже. Наиболее характерным примером адаптации с последовательной передачей информации может служить модель такого свойства корабля, как остойчивость. В дальнейшем этот пример нам понадобится для иллюстрации процесса агрегирования системных моделей.

Остойчивость корабля как качественная категория адекватно может быть охарактеризована только бесконечным числом количественных показателей. В модельном же плане речь, конечно, может идти лишь о каком-то конечном перечне, к которому можно отнести:

- начальную поперечную метacentрическую высоту  $h_{0c}$ ;
- предельную скорость выдерживаемого кораблем ветра  $v_{cr}$ ;
- угол крена корабля на циркуляции  $\theta_c$ ;
- угол заката диаграммы остойчивости  $\theta_d$ ;
- период бортовой качки корабля  $\tau$ ;
- запас остойчивости  $\Delta h_c$  и др.

С точки зрения оценки остойчивости как одного из основных свойств корабля необходимо рассматривать всю совокупность перечисленных параметров. Однако, как правило, в модельной реализации удается учитывать не более одного. Причиной такого ограничения и является необходимость адаптации моделей в системном комплексе.

Наиболее сложно вычисляется и вместе с тем наиболее полно характеризует остойчивость предельная скорость выдерживаемого кораблем ветра  $v_{cr}$ . Это связано с тем, что при ее вычислении используются диаграммы статической и динамической остойчивости, позволяющие оценить остойчивость корабля на больших углах накренивания при действии шквального ветра. В то же время, если иметь в виду, что полученная оценка остойчивости в последующем будет использована при построении показателя, например, испотопляемости, то, как будет показано в дальнейшем, при оценке этого свойства используется только величина  $h_{0c}$ . Таким образом, структура модельного фрагмента, которому последовательно передается вычисляемый показатель свойства, полностью определяет выбор переменной, выступающей в качестве этого показателя.

Учитывая жесткие ограничения на число показателей остойчивости и необходимость в то же время как можно более полной оценки моделируемого свойства, возникает вопрос о выявлении возможной связи между отдельными показателями, с помощью которой можно было бы выразить один показатель через другие. Существование такой связи может служить также примером

адаптации при последовательной горизонтальной передаче информации, если она в дальнейшем будет использована для построения гибридной зависимости с использованием результатов другой предметной области. Так, в рассматриваемой задаче существует возможность связать период бортовой качки корабля  $\tau$  с начальной поперечной метacentрической высотой  $h_{0c}$ . Основой для этого служит известная формула для определения периода собственных поперечных колебаний корабля:

$$\tau = 2\pi(I + dI) / g\Delta h_{0c} \quad (5.30)$$

где  $I$  — момент инерции массы корабля относительно продольной центральной оси;  $dI$  — момент инерции приосновной массы воды;  $g$  — ускорение свободного падения.

Если корабль заменить прямоугольным параллелепипедом равной массы, которая распределена равномерно по его поперечному сечению в виде прямоугольника высотой  $H$  и шириной  $B$ , то

$$I = D(B^2 + H^2) / 12 \quad (5.31)$$

Если принять, что величина  $dI$  составляет долю от  $I$ , а между  $B$  и  $H$  сохраняется достаточно устойчивое соотношение, при подстановке (5.31) в (5.30) и замене постоянных некоторым среднестатистическим коэффициентом  $C$  выражение для определения периода бортовой качки корабля как функции от  $h_{0c}$  примет следующий вид [286]:

$$\tau = C B \sqrt{h_{0c}} \quad (5.32)$$

Известны и другие подобные выражения. Например, формула Г. А. Фирсова для определения угла крена корабля на циркуляции [286]

$$\theta_c = 1,4 \theta_c^* (z_g - T/2) / (h_{0c} L) \quad (5.33)$$

где  $z_g$  — возвышение центра тяжести корабля над основной плоскостью.

Как было указано в предыдущем параграфе, одной из основных особенностей создания системных моделей является их ориентация на конечный результат, как правило, связанный с обоснованием проектного или технического решения. Такая



ориентированность системных моделей хорошо коррелируется с проблемно-ориентированным характером прикладных исследований вообще и системных исследований, в частности. Применение жесткой проблемной ориентации в выполняемых исследованиях ведет к необходимости рассматривать иерархическую структуру системной модели, определенную порядком выполнения исследований, снизу вверх и от частного к общему. Обобщая результаты исследования частных моделей, разработанных в различных предметных областях, и формируя интегральную оценку работы всего программного комплекса, мы получаем единый процесс, получающий название агрегирования системных моделей.

Таким образом, под агрегированием мы понимаем процесс объединения результатов моделирования частных фрагментов системной модели с целью получения оценки свойства более высокого иерархического уровня.

Наиболее известным примером агрегирования является построение модели такого сложного системного свойства корабля, как живучесть. При формировании его количественной оценки в качестве наиболее простых свойств рассматриваются такие, как плавучесть, остойчивость, пожароопасность, взрывоопасность, надежность технических средств, подготовленность экипажа и др. Затем, на основе результатов моделирования, например, плавучести и остойчивости, разрабатывается модель более сложного свойства — непотопляемости. Модель непотопляемости, взрыво- и пожаробезопасности и живучести технических средств составляют группу свойств следующего иерархического уровня. Совместно с моделью оценки борьбы за живучесть летного состава эти модели образуют модель живучести корабля. В качестве фрагмента описанного процесса агрегирования системной модели живучести в примера, иллюстрирующего этот процесс, рассмотрим модель оценки непотопляемости корабля, включающую в себя результаты моделирования остойчивости, непотопляемости и т.п. равно при изложении вопросов адвтанции.

Для обеспечения непотопляемости проект корабля должен иметь удовлетворительные значения следующих показателей:

- высоты надводного борта после затопления  $H_{\text{ост}}$ ;

- угла установившегося статического крена  $\theta_0$ ;
- начальной поперечной метacentрической высоты после повреждения  $\Delta_{\text{ст}}$  и др.

Перечисленные показатели вычисляются при некоторых заданных условиях затопления корабля. За основу таких условий принимается затопление некоторого числа смежных водонепроницаемых отсеков общей длиной не менее определенной доли длины корабля. При этом с точки зрения обеспечения непотопляемости наилучшим случаем затопления эквивалентного отсека, равного по объему всей зоне затопления, будет непотопляемое затопление открытого сверху отсека, сообщающегося с заборной водой. В нашем примере такой случай будет реализован для несимметричного затопления отсека в оконечности корабля, создающего крен и дифферент.

Исходя из условий затопления, необходимо выполнить оценку всех перечисленных выше показателей непотопляемости.

Используя метод постоянного водоизмещения, начальную поперечную метacentрическую высоту можно оценить с помощью выражения

$$H_{\text{ост}} = h_{\text{ст}} + v_{\text{от}}(T + v_{\text{от}} / (2GS - \varepsilon)) - z_{\text{г}} - h_{\text{от}}(v_{\text{от}}) / V, \quad (5.34)$$

где  $h_{\text{ст}}$  — начальная поперечная метacentрическая высота до повреждения;  $v_{\text{от}}$  — объем воды в затопленном отсеке по первоначальной ватерлинии;  $S$  — площадь ватерлинии корабля;  $\varepsilon$  — потерянная площадь ватерлинии;  $z_{\text{г}}$  — аппликата центра тяжести объема  $v_{\text{от}}$ ;  $h_{\text{от}}$  — потерянный момент инерции площади ватерлинии относительно оси  $Ox$ ;  $V$  — объемное водоизмещение корабля.

Считая, что при несимметричном затоплении отсек затоплен от борта до дальнего из двух продольных переборок, расстояние между которыми равно  $l$ , объем воды в затопленном отсеке составит:

$$v_{\text{от}} = \mu l [0,25(v_0 + v_1) + 0,57l], \quad (5.35)$$

где  $l$  — длина затопленного отсека, выраженная в долях длины корабля;  $\mu$  — коэффициент проникновения отсека;  $v_0, v_1$  — пло-

щадь крайних носового и кормового шпангоутов в районе затопления.

Указанные площади могут быть найдены по приближенной формуле вида

$$s_i = B^2 \beta [1 - (2x_i/L)^{2\beta-1} - \alpha_i], \quad (5.36)$$

где  $\beta$  — коэффициент полноты мидель-шпангоута;  $x_i$  — абсцисса  $i$ -го шпангоута (в долях длины корабля);  $\alpha$  — коэффициент продольной полноты корабля ( $\alpha = \delta/\beta$ ).

Потерянная площадь ватерлинии

$$s = \beta(B_n + B_k)/4 + \delta/2, \quad (5.37)$$

где  $B_n$  и  $B_k$  — ширина корабля у носовой и кормовой переборки зоны затопления.

Для отсеков в кормовой оконечности корабля, что является наиболее опасным случаем, эти величины могут быть найдены по аналогичным формулам Г. И. Попова:

$$\beta_i = \beta [1 - (2x_i/L)^{2\beta-1} - \alpha_i], \quad (5.38)$$

где  $\alpha_i$  — коэффициент полноты кормовой ветви ватерлинии, определяемый из выражения:

$$\alpha_i = 0,99\alpha + 0,007 - 2,3x_i/L, \quad (5.39)$$

где  $x_i$  — абсцисса центра тяжести площади ватерлинии.

Абсцисса центра величины объема  $v_{i-1} - v_i$  в первом приближении может быть принята равной абсциссе центра величины корабля до поврежденного  $z$ .

Собственный момент инерции потерянной площади ватерлинии

$$i_{i0} = \beta(B + b)^2/96,$$

Ордината центра тяжести потерянной площади ватерлинии

$$y_i = (B - b)/4,$$

Ордината центра тяжести действующей площади ватерлинии

$$y'_i = s_i / (S - s_i).$$

Тогда потерянный момент инерции может быть определен из выражения

$$i_{i0} = i_{i0} + sy_i^2 + (S - s)y_i'^2. \quad (5.40)$$

Угол установившегося статического крена в градусах определяется выражением

$$\theta_{ст} = 57,3v_{ст}(\beta y_i - y_i')/(V\bar{H}\sigma_{ст}), \quad (5.41)$$

где  $\beta y_i$  — ордината центра тяжести затопленного отсека принимается равной ординате центра тяжести потерянной площади ватерлинии  $y_i$ .

Высота надводного борта в кормовой оконечности может быть определена по изменению средней осадки после затопления, углу крена и дифферента, как это показано в следующей формуле для  $i$ -го шпангоута:

$$(H_{ст,i}) = H_i - T - v_{ст}/(S - s) - v_{ст}(x_i - x'_i)/(S - s) + (Sx'_i - sx_i)/(S - s)/(V\bar{H} - i_{ст}/V) - B_i \text{tg}\theta_{ст}/2, \quad (5.42)$$

где  $H_i$  — высота борта корабля на  $i$ -м шпангоуте;  $x_i$  — абсцисса центра тяжести затопленного отсека, принимаемая равной абсциссе центра тяжести потерянной площади ватерлинии  $x_i$ .

$$x_i = x_i + x_n + \beta(B_n + 2B_k)/(3\beta(B_n + B_k)), \quad (5.43)$$

где  $x_n$  — абсцисса носовой переборки зоны затопления;  $x'_i$  — абсцисса центра тяжести действующей площади ватерлинии

$$x'_i = (Sx_i - sx_i)/(S - s); \quad (5.44)$$

$i_{ст}$  — потерянный момент инерции площади ватерлинии относительно оси  $Oy$ :

$$i_{ст} = s(x_i^2 - x_i'^2) + S(x_i'^2 - x_i^2). \quad (5.45)$$

Из зависимостей (5.34) — (5.42) можно видеть, что для оценки непотопляемости используются параметры, которые выступают в качестве показателей устойчивости и ряда других свойств корабля. Такое непосредственное вложение результатов анализа свойств более низкого уровня в модель более высокого уровня

может быть характеризовано как прямое, или непосредственное агрегирование. Прямое агрегирование будет реализовываться и тогда, когда оценка сложного свойства формируется в виде некоторой комбинации оценки более простых свойств, например, в линейной свертке. Более сложное агрегирование, которое также присутствует в нашем примере, реализуется на некотором новом качественном уровне, когда помимо вложения показателей простых свойства используется некоторая самостоятельная обусловленность, вытекающая из самого понятия свойства более высокого уровня. Так, при оценке непотопляемости значения таких контролируемых параметров, как начальная поперечная метацентрическая высота, высота надводного борта и угол установившегося крена, используются не как абсолютные показатели непотопляемости, а только как средство проверки выполнения заранее оговоренных условий затопления (число смежных затопленных автономных отсеков, которое выдерживает корабль, с общей длиной затопления не меньше заданной).

Подводя итог краткому рассмотрению основных приемов системного моделирования свойств корабля, можно отметить, что если редукционирование представляет собой основной инструмент трансформации исходных моделей, разрабатываемых в предметных областях, в интересах построения системной модели, то агрегирование является в большей степени инструментом системного анализа и менее всего связано с естественно-научной природой моделируемых явлений. Методологическая связь между предметной и системной областями, обеспечивающая непрерывность процесса системного моделирования, реализуется в рамках адаптации.

### РАЗДЕЛ III

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛАВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОРАБЛЯ

### Глава 6. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛАВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОРАБЛЯ

#### 6.1. ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛАВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОРАБЛЯ

Одной из основных задач теории проектирования является создание методов определения главных элементов корабля. При этом часть главных элементов задается в задании на проект или выбирается при проектировании в результате концептуального анализа проекта. Эти элементы считаются заданными и в дальнейшем на ранних этапах проектирования не рассматриваются. Другие главные элементы корабля (форма обводов или коэффициенты формы корпуса, массы и координаты центров тяжести составляющих весовой нагрузки, основные показатели остойчивости и непотопляемости, вместимости корпуса, мощности механизмов на основных режимах хода и т. д.) определяются и уточняются при определении размеров корабля. Для краткости изложения в дальнейшем размеры и ряд других главных элементов корабля, не являющихся содержанием задания на проект, будем называть главными элементами корабля.

После выбора главных элементов корабля — длины, ширины, высоты борта, формы обводов корпуса и т. д. — его основные кораблестроительные свойства в значительной степени будут предпретены. Если найдены главные размеры корабля, выбрана форма обводов, установлена архитектура корпуса и его конструкция, выбрана система защиты, составлена принципиальная схема общего расположения на корабле, установлены основные показатели мореходных свойств, то вся последующая работа по разработке проекта является детализацией принятых

ранее решений. Последняя будет уже базироваться не на теории проектирования, а на отдельных вопросах теории корабля, строительной механики, Технологии кораблестроения и т. п. Все расчеты, связанные с устойчивостью, ходкостью, мореходностью, прочностью и другими свойствами корабля, будут носить вспомогательный характер. В основу этих расчетов будут положены ранее установленные главные элементы корабля.

Задача по определению главных элементов корабля обладает большой сложностью, поскольку необходимо удовлетворить большому числу требований, предъявляемых к проектируемому кораблю, а следовательно, найти большее число определяющих эти требования элементов при наличии сложной и в ряде случаев противоречивой взаимосвязи между ними и ограниченности числа уравнений, связывающих между собой элементы и характеристики корабля. В теории проектирования подходы к решению этой задачи имеют значительную историю, в том числе и в период, когда электронно-вычислительные средства не были широко распространены.

Из всех разработанных к настоящему времени теоретических средств определения главных элементов корабля на ранних стадиях проектирования можно выделить группу методов определения главных элементов на основе решения уравнения масс (дифференциальные методы, методы проектирования, искомого параметра, однопольной италонной модели, а также современные численные методы непосредственного решения уравнения масс), методы совместного решения уравнений масс и вместимости и, наконец, вариационные методы (например, Д. В. Дорогоострайского) [236]. Большая часть этих методов разрабатывалась в интересах выполнения проектных работ в организациях ВМФ и промышленности. Неслучайно поэтому их авторами нередко были сами конструкторы кораблей. Однако, начиная примерно с конца 50-х годов, заинтересованность в разработке новых методов со стороны практиков проектирования стала заметно падать. Эта тенденция явилась следствием целого ряда причин, в том числе организационного характера. С теоретической же точки зрения главным фактором, приведшим к утрате интереса практического проектирования к аналитическим

(графоаналитическим) методам, явилось, по-видимому, резкое снижение плотности оружия и вооружения на современных кораблях, прежде всего ракетного, авиационного и радиолокационного, т. е. уменьшение отношения массы вооружения к запасу к занимаемому ими объему, а также увеличение взаимопланирования элементов вооружения на корабле. Эта тенденция продолжает развиваться. Причем уже для кораблей 60-х годов водоизмещение и их главные размерения определялись не из уравнения масс, а скорее вместимостью и особенностями общего расположения. Поскольку достаточно точных аналитических выражений для учета этих факторов в то время разработать не удалось, в проектных организациях вернулись к испытанному подходу — "прорисовке проекта". В научно-исследовательских организациях неудовлетворенность аналитическими методами привнесла, значительно позже, когда широко распространение получили методы оптимизации тактико-технических характеристик как аппарата обоснования состава оружия, вооружения и сочетания основных свойств корабля. При практическом использовании этих методов в качестве независимых переменных, как правило, принимались компоненты оружия и вооружения, т. е. полезной нагрузки корабля. Со временем выяснилось, что при варьировании полезной нагрузки в требуемых для оптимизации широких пределах аналитические модели не позволяют получать необходимую точность расчетов уже при незначительном отклонении независимых переменных от опорного варианта. Кризис в теории, вызванный этим обстоятельством, в значительной степени сохраняется и сегодня.

Прежде чем рассматривать возможные пути выхода из сложившейся в области методов определения главных элементов корабля ситуации, необходимо, очевидно, выяснить, какова степень актуальности этих задач вообще. В начале автоматизации проектных расчетов актуальность разработки методов определения главных элементов обычно обосновывалась с точки зрения экономии времени и трудозатрат по сравнению с выполнением традиционных проектных прорисовок. После ряда неудачных попыток этот аргумент отошел на второй план, так как стало ясно, что в рамках аналитических моделей (здесь уже имеются

В виду также и алгоритмических модосов, сохранивших, однако, теоретическую основу аналитических методов) получить сравнимую точность вычислений не удастся. В то же время по мере развития оперативно-тактических и экономических исследований, обеспечивающих реализацию задачи оптимизации, постоянно росла потребность в информации о проектируемом объекте. Такая информация могла быть получена только на основе совершенствования методов определения главных элементов корабля. То обстоятельство, что упомянутый выше военно-экономический анализ решается в рамках задачи оптимизации, предлагающей рассмотреть почти  $N = m^k$  вариантов ( $n$  — число оптимизируемых параметров, а  $m$  — математическое ожидание числа альтернативных значений, принимаемых каждым из этих параметров), требует применения методов, позволяющих создавать образ корабля относительно быстро (около 1 мин) и достаточно подробно (чтобы получить необходимый объем информации). И здесь не следует обманываться соображением об "относительно небольшом числе практически реальных вариантов", которое позволило бы уйти от необходимости разработки методов определения главных элементов и ограничиться несколькими проектными проработками. Легко видеть, что величина  $N$  при семи—девяти варьируемых параметрах (это является обычным) и хотя бы пяти принимаемых ими значениях младше 2 в интервале от 80 000 до 2 млн. Даже если только одна десятая этой величины будет реализована, то и такое число проработок традиционным путем выполнить невозможно. Таким образом, актуальность развития машинных методов построения образа проектируемого корабля выматывается не столько стремлением сократить трудоемкость проектных работ без заметного снижения точности вычислений (эти соображения полностью оправдывают себя на более поздних стадиях разработки проекта), сколько принципиальной невозможностью каким-либо другим путем генерировать необходимые для оптимизации количество альтернативных вариантов, пусть даже и со значительно меньшей точностью.

И все же несмотря на очевидную необходимость дальнейшего развития методов определения главных элементов корабля

с целью повышения степени их адекватности, существуют гораздо более серьезные причины для сосредоточения усилий в этом направлении, нежели необходимость просмотра большого числа вариантов. Речь в данном случае идет о том, что по мере возникновения новых проблем кораблестроения и создания в связи с этим более информативных задач анализа свойств проектируемых кораблей все сложнее становится осуществлять выбор предпочтительного варианта на поле большого числа альтернатив. В целом можно сказать, что оптимально относительно будущего этого направления непосредственно связан с успехом в развитии теории принятия решений. При этом так же, как и во многих других предметных областях, при формировании аппаратных средств обоснования проектных решений значительную роль играет функциональный анализ. Для того чтобы сохранить этот мощный инструмент исследования, необходимо во всяком случае иметь возможность порождать настолько близкие альтернативы, чтобы их последовательность могла рассматриваться как гладкая функция (отклика). Актуальность разработки методов определения главных элементов корабля в этом смысле определяется тем обстоятельством, что сам процесс получения главных элементов, по сути, представляет собой такую функцию.

Методологической основой для разработки методов определения главных элементов проектируемых кораблей является системный подход. Исходя из этой методологии, сформулированную задачу следует рассматривать как задачу синтеза образа системы, иначе говоря, обратную задачу анализа (в проектировании также часто используется термин "обратная задача проектирования").

Качественным отличием задачи синтеза от задачи анализа является то, что в результате ее решения добывается значительно большее количество информации о состоянии системы. С математической точки зрения этот факт объясняется многосвязным характером задачи синтеза (например, под заданную полезную нагрузку теоретически можно создать бесконечное число вариантов корабля). Раскрывая заложенную в задаче синтеза неопределенность с точностью до альтернатив, мы получаем принципиально больше информации, чем на на том же уровне аппро-

разных средств можно получить в результате решения задачи анализа, когда имеется в виду, что объект анализа существует и движется. Учитывая эту особенность, следует ожидать, что дальнейшее развитие методов определения главных элементов проектируемых кораблей будет прежде всего связано с совершенствованием механизмов получения большого количества информации, обеспечивающей всесторонний анализ единственно возможных вариантов в интересах их последующей сравнительной оценки.

Принадлежность решения этой задачи может идти двумя путями. Первый из них предполагает получение дополнительной информации об образе системы за счет последовательного принятия конечного числа решений на основе априорной информации. При этом объектом выбора могут быть как отдельные конструкции решения, так и фрагменты моделей и даже значения отдельных величин. Отличительным признаком механизмов такого типа, обеспечивающих их реализацию в приемлемые сроки, является так называемое правило ситуационного выбора, позволяющее на основе сложившейся конструктивной ситуации принимать решение относительно одной из имеющихся конструктивных альтернатив. Это исключает необходимость полного перебора возможных проектно-конструкторских решений и обеспечивает последовательное (бесцикловое) прохождение задачи. Оставляя в стороне вопрос о доказательности такого подхода, следует отметить, что его реализация с вычислительной точки зрения ведет к сильной алгоритмизации модели и, возможно, утрате необходимых условий сложности решения. Преодоление этого препятствия составляет одну из наиболее актуальных задач рассматриваемого направления.

Другой путь развития методов определения главных элементов является более традиционным. Он предусматривает повышение информативности создаваемого образа за счет наращивания числа уравнений существования (замыкающих условий типа равенств) и разрешения их относительно своих переменных как системы. Одним из примеров реализации этого пути являются методы, основанные на совместном решении уравнений масс и жесткости. Современная проблематика описываемого подхо-

да заключается в том, что такие наиболее актуальные проблемы военного кораблестроения, как электромагнитная совместимость, совместное использование оружия, живучесть кораблей и т.д., для оценки степени их разрешения на проектируемом корабле нуждаются в информации, формируемой на основе геометрического образа системы. В то же время получить эту информацию в виде решения системы уравнений пока не представляется возможным. Выход из создавшегося положения может быть найден путем частичного разрешения системы замыкающих уравнений (т.е. получения частично независимых решений) с одновременным сокращением числа вложенных циклов за счет алгоритмизации задачи на основе механизмов ситуационного выбора.

Таким образом, задача определения главных элементов проектируемого корабля имеет высокую степень актуальности в направлении разработки теории и методов исследовательского проектирования. По своему методологическому содержанию эта задача представляет собой средство формирования образа проектируемого корабля. Целью ее решения ставится получение достаточно адекватного и необходимого объема информации, с тем чтобы выполня на основе этой информации сравнительный анализ генерируемых образов, иметь возможность более обоснованного выбора предпочтительного варианта корабля. При этом основным вышле подхода к решению задачи определения главных элементов находится в определенном диалектическом противоречии. Суть его заключается в том, что при реализации первого подхода, обеспечивающего относительную простоту задачи, а значит, и возможность учета большого числа действующих факторов, может быть утрачена доказательность рассуждений и сходимость задачи. При реализации второго подхода растущие вычислительные трудности и необходимость в дополнительной информации ведут к утрате возможности решения задачи и достоверности получаемых результатов. Поиск удачного сочетания обоих подходов при одновременном понимании их достоинств и недостатков представляется сегодня наиболее перспективным направлением работ в этой области.

Для облегчения реализуемости изложенных выше теоретических принципов в практике исследовательского проектирования определение главных элементов обычно осуществляется в два этапа (в системной терминологии это соответствует двухуровневому представлению) или, как говорят, в двух приближениях. Методы определения главных элементов корабля в первом приближении отличаются от методов второго приближения тем, что в последних для получения более полной информации о проектируемом корабле используют эскизные графические прорисовки, более точные моделиные зависимости и варианты методы поиска окончательного решения.

Несмотря на указанные основные отличия подходов к определению главных элементов корабля в первом и втором приближениях, эти методы имеют много общих черт. Во-первых, определение элементов корабля сводится к составлению и решению системы уравнений, во-вторых, основу функционального назначения математических моделей в обоих случаях составляют зависимости, построенные с использованием прототипов на основе применения теории подобия и математической статистики.

В заключение необходимо отметить, что в современной литературе по теории проектирования представлено большое многообразие методов определения главных элементов корабля. Это объясняется тем, что при проектировании кораблей и судов различных классов и назначения возникают существенные особенности, заметно влияющие на методики расчетов и сами методы определения главных элементов проекта. Значительное число методов определения главных элементов связано также и с тем, что они разрабатывались в различное время, на различных этапах развития теории проектирования и вычислительных средств. В настоящем учебнике будут изложены наиболее современные версии этих методов, ориентированные на применение вычислительной техники, которые могут быть использованы для проектирования надводных кораблей только основных классов (водонесущающего типа крупного и среднего водоизмещения).

## 4.2. ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ПРОЕКТИРОВАНИЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Термин "обратная задача" неоднократно встречается в различных разделах математики и прикладных дисциплинах. В самом широком его понимании он содержит общий для всех случаев смысл: речь идет об "обращении" некоторой исходной, естественным образом сложившейся задачи. Однако при более внимательном изучении можно усмотреть и принципиальные отличия между обратными задачами, упоминающимися в различных областях знания. Поскольку изложение общей методологии постановки обратных задач не является целью настоящего учебника, мы ограничимся только рассмотрением обратной задачи, возникающей при проектировании технических объектов, в частности корабля. Этот термин в теории проектирования внес, по-видимому, И. Г. Бублин, когда в своей статье "Об одном методе определения главных размеров проектируемого судна" [47] писал: "Имея готовые чертежи и нагрузку судна, мы в большинстве случаев можем с достаточной степенью точности установить, каким именно заданием будет удовлетворять построенное по этим чертежам судно; многочисленные и часто очень сложные расчеты, которые нужно произвести для этого, и составляют предмет теории корабля, строительной механики корабля, судовой механики и электромеханики и разных других отделов обширной науки кораблестроения. Проектирование ставит нам обратную задачу — создать чертежи судна, отвечающего определенным заданием: легко понять, насколько трудна и сложна эта задача по сравнению с первой". Таким образом, цель постановки обратной задачи проектирования заключается в "создании чертежей судна, отвечающего определенным заданием". С точки зрения теории проектирования разработка чертежей эквивалентна созданию образа проектируемого корабля, описанного в математических символах или графически с требуемой степенью подробности. На этапе исследовательского проектирования можно считать, что решение этой задачи уже достигается при определении главных элементов будущего корабля, под которыми обычно понимаются главные размеры, водоизмещение и другие основные характеристики проекта.

Причины сложности обратной задачи, на которую обращал внимание И. Г. Бублин, будут более понятны, если рассмотреть следующий упрощенный пример.

Пусть решается одна из задач строительной механики корабля. Дана балка, определенным образом закрепленная на двух опорах и находящаяся под действием заданной силы  $P$ . Необходимо определить величину прогиба балки  $w$  в точке приложения силы. В соответствии с существующими методами расчета прогиб балки может быть найден путем интегрирования дифференциального уравнения вида

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} = N(x), \quad (6.1)$$

где  $E$  — модуль упругости,  $I$  — момент инерции балки, а  $N(x)$  — перерезывающая сила.

В результате решения этой задачи выражение для определения прогиба балки в точке приложения силы  $x_0$  будет иметь вид

$$w(x_0) = F(E, I, P, x_0, \Omega), \quad (6.2)$$

где в качестве аргумента функции  $F$  помимо уже известных нам величин присутствуют также условия закрепления балки, обозначенные здесь буквой  $\Omega$ .

В реальных задачах, кроме  $E$ ,  $I$  и  $\Omega$  может учитываться и ряд других величин, существенно влияющих на ее решение. При проектировании совокупность таких величин заменяется понятием образа проектируемого объекта, в данном случае балки, так как в рамках решаемой задачи они дают необходимое представление о балке как о материальном объекте. При этом следует подчеркнуть, что для теоретически полного описания образа объекта потребуется бесконечное число величин, поскольку между качественными и количественными категориями не существует адэкватного перепада. В рассматриваемой задаче могут присутствовать также величины, описывающие не балку, а ту среду, в которой происходит процесс нагружения, однако в данном случае как эти величины не интересуют, и в дальнейшем мы их опускаем.

В качестве обратной задачи при проектировании рассматриваемой конструкции могла бы выступать задача создания такой балки, которая под воздействием силы  $P$  прогибалась ровно на величину  $w(x_0)$ . Аналогично выражению (6.2) обеспечивающее решение такой задачи уравнение примет вид

$$IM = F(w(x_0), P), \quad (6.3)$$

где  $IM = [E, I, \Omega, \dots]$  — комплекс величин, составляющих образ балки.

Сравнивая задачи (6.2) и (6.3), можно отметить сразу несколько особенностей. Первое, что бросается в глаза, это то, что если прямая задача почти всегда имеет одно единственное решение, то принципиально можно создать бесконечное множество балок, удовлетворяющих условиям обратной задачи. Именно эта особенность обратной задачи приводит к необходимости рассматривать при проектировании несколько конкурентоспособных вариантов, а в общем случае — находить главные элементы корабля как результат решения задачи оптимизации. Однако в содержании, постановке и особенностях этой задачи поверить еще преждевременно по целому ряду причин. Сейчас же достаточно будет отметить, что при традиционном решении обратной задачи проектирования считается достаточным построить любой конкурентоспособный вариант. Поэтому эту задачу иногда также называют задачей произвольного синтеза.

Для того чтобы укорочить последующее сравнение прямой и обратной задач, воспользуемся методологией системного подхода и применим ее к описанию объекта синтеза. Из параграфа 1.2 нам известно, что система может иметь во всяком случае три аспекта описания: информационный, морфологический и функциональный. Причем поскольку совокупность этих аспектов создает целостное представление об исследуемом объекте, то речь, очевидно, не может идти об уложении или упрощении обратной задачи относительно прямой вообще, а лишь о балке ее особенностях, которые, усложняя какие-либо аспекты описания обратной задачи, упрощают другие. С точки зрения информационного описания объект проектирования (далее под этим объектом мы будем понимать корабль) представляет



собой механизмы преобразования информации. Если предположить, что создаваемая модель образа адекватно отображает объект, то тогда в прямой задаче для нахождения точного значения, например, в рассмотренном ранее случае балки, ее прогиба, а при проектировании корабля это могут быть любые характеристики его свойств (поперечная меташпиральная высота, угол крена на циркуляции, значение напряжений в удаленных фибрах корпусных конструкций и так далее) потребуются бесконечно большое количество информации. В обратной же задаче наоборот — на основе ограниченной информации о некоторых характеристиках свойств корабля необходимо построить его адекватный образ. Иными словами, любая прямая задача концентрирует информацию для получения необходимого результата, в то время как обратная как бы "размножает" ее для создания целостного образа по отдельным его фрагментам.

Значение информационного представления обратной задачи проектирования и сравнения ее с прямой задачей заключается, на наш взгляд, в понимании иной природы обратной задачи. В то время как постановка прямой задачи отвечает целям установления причинно-следственных связей наблюдаемых явлений, а ее решения решаются на основе законов и закономерностей, подмеченных в природе и сформулированных в виде формальной записи, обратная задача для своего разрешения требует значительно большего. Причем поскольку никаких иных естественно-научных знаний, кроме уже использующихся при решении прямой задачи, в распоряжении исследователя не имеется, следует искать новые пути получения необходимой информации. Таких путей несколько, и позже мы рассмотрим особенности их реализации. Однако сейчас, чтобы показать принципиальную возможность разрешения обратной задачи, следует упомянуть только один, причем наиболее значимый из них.

Перепишем выражения (6.2) и (6.3) в виде следующих двух уравнений соответственно:

$$y = F(x); \quad (6.4)$$

$$x = F(y); \quad (6.5)$$

где  $x$  — вектор независимых переменных, под которыми понимается некоторая данность задачи (в проектировании в качестве величины  $x$  может рассматриваться, например, водоизмещение корабля);  $y$  — вектор значений характеристик корабля, т. е. вектор зависимых переменных. В качестве этой величины в выражении (6.4) обычно выступают показатели свойств корабля, а в (6.5) — места вооружения и боекомплекта. (Следует помнить, что понятия независимых и зависимых переменных носят относительный характер. В данном случае для удобства изложения они введены применительно к выражению (6.4). Однако, как правило, в теории проектирования они используются применительно к выражению (6.5), т. е. в противоположном смысле.)

В основу излагаемого подхода положено фундаментальное понятие итерации, представляющее собой общую схему повторяющегося снова и снова одного и того же процесса. Введение этого понятия позволяет заменить задачу (6.5) по отысканию некоторого значения синтетической функции  $F_1$ , обратной функции  $F$  многократным решением задачи (6.4). Так, если построить отношение

$$R(x, y, y', F(x) |), \quad (6.6)$$

которое имеет место тогда, когда  $y'$  есть число, следующее за числом  $y$ , и существует пусть даже очень большое число  $n$  такое, что для любого сколь угодно малого значения  $\epsilon$  выполняется

$$n > n_\epsilon \Rightarrow |y_n - y'| < \epsilon,$$

то решением уравнения (6.5) будет значение  $x_n$ , а само выражение (6.5) для точки решения задачи примет вид

$$x_n = F_1(y_n). \quad (6.7)$$

Уже из этого примера видно, что обратная задача для модели одного уровня сложности потребует в случае реализации итерационного процесса ее решения во всяком случае и в раз больший затрат расчетного времени. При этом усложняется и сама структура решения из-за необходимости создания механизма управления процессом. (Здесь, разумеется, речь еще не идет о вычислительных процедурах, а дается только качественная, ме-

топологическая оценка, позволяющая не более чем расширить представление о самой позитивной обратной задаче.) Понимание содержания обратной задачи проектирования может быть расширено также за счет рассмотрения ее с морфологической точки зрения. В параграфе 1.2 нами уже были рассмотрены два основных и диалектически противоположных принципа декомпозиции системы: стратификация и эшелонирование. Поскольку только стратификация предусматривает аспектное видение объекта, то именно этот принцип может быть реализован в прямой задаче — задаче анализа. Так, при анализе гидродинамических характеристик корабля он рассматривается как движущееся в воде жесткое тело; при исследовании его прочностных свойств — как деформируемая оболочечная конструкция и т. п. При постановке обратной задачи реализуется принцип эшелонирования, так как одним из существенных отличий этого принципа от стратификации является наличие замыкания, которое и обеспечивает возможность создания целостного образа корабля. В практических приложениях эшелонированная структура задачи находит свое выражение в необходимости вводить в рассмотрение некоторые аддитивные, т. е. способные к сложению переменные, и строить относительно этих переменных математические модели отдельных материальных частей корабля, с тем чтобы впоследствии сумма значений этих переменных давала величину, характеризующую корабль в целом. В качестве таких переменных, иногда называемых обобщенными, обычно выступают водоизмещение корабля, площадь его внутренних помещений, общий внутренний объем, некоторые линейные размеры. В силу необходимости обеспечить при эшелонировании взаимосвязь между материальными элементами системы при одновременном выполнении условия их замкнутости, с морфологической точки зрения обратная задача также является более сложной по отношению к прямой. Структура эшелонированной модели корабля может иметь вид, показанный на рис. 6.1. Здесь в качестве обобщенной переменной выступает массовое водоизмещение.

Наконец функционально обратная задача, как это уже можно было видеть на примере с бабкой, представляет собой процесс

формирования обратной функции или во всяком случае ее значения в заданной точке аргумента. Здесь вычислительные трудности при решении задачи будут возрастать в зависимости от количества учитываемых обобщенных переменных. Например, при организации итерационного процесса каждая из этих переменных потребует своего охватываемого цисла, что приведет к росту вычислительной сложности задачи по показательному закону. С математической же точки зрения с ростом числа обобщенных переменных сложность функционального описания будет возрастать лишь прямо пропорционально, поскольку каждая переменная требует создания нового фрагмента математической модели.



Рис. 6.1

Если считать, при этом, что возможности вычислительной техники для решения прямой и обратной задач примерно одинаковы, то следует предположить, что функциональное описание обратной задачи должно быть значительно упрощено по сравнению с описанием прямой. Этот вывод вытекает как из того, что информационное и морфологическое описание обратной задачи оказываются сложнее, так и из такого непосредственно наблюдаемого факта, что функционально обратная задача включает в себя совокупность прямых задач. Становится ясным, что модели, отвечающие этим задачам, должны представлять из себя сложное (по меньшей мере кратное числу прямых моделей) упрощение по отношению к исходным прямым задачам.

В этом случае часто говорят, что фрагменты обратной задачи являются результатом редукции исходных прямых задач.

Помимо редукции исходные прямые задачи, становясь фрагментами обратной задачи проектирования, претерпевают также трансформацию относительно переменных. Эта трансформация затрагивает как зависимые, так и независимые переменные. Например, если организуется замыкание по  $m$  обобщенным переменным, то функционально решение обратной задачи будет представлять собой решение системы из  $m$  уравнений относительно этих переменных. В этом случае в качестве зависимых переменных прямых задач, выступающих фрагментами обратной задачи, могут быть тогда обобщенные переменные элементов шпелонирования корабля, а в качестве независимых — обобщенные переменные корабля в целом. Так, система уравнений относительно двух таких обобщенных переменных, как масса и вместимость внутренних помещений корабля, может быть записана следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} M &= \sum_j m_j \\ V &= \sum_j v_j \end{aligned} \right\} \quad (6.8)$$

В общем случае в качестве неизвестных системы (6.8) могут выступать обобщенные переменные корабля: масса  $M$  и вместимость  $V$ , хотя, как будет показано в последующих разделах, обычно это делается несколько иначе. Но если так, то система (6.8) может быть переписана в виде

$$\left. \begin{aligned} \sum_j m_j(M, V) - M &= 0 \\ \sum_j v_j(M, V) - V &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6.9)$$

где каждый член сумм представляет собой модель шпелонированного элемента корабля по массе или вместимости, которая описывается соответствующими функциями:

$$\left. \begin{aligned} m_j &= m_j(M, V) \\ v_j &= v_j(M, V) \end{aligned} \right\} \quad (6.10)$$

Описанный процесс трансформации переменных моделей прямых задач, вкладываемых в обратную задачу, часто называется адаптацией переменных в структуре обратной задачи. Решение вопросов редукции и адаптации прямых задач непосредственно связано с проблемой организации системных исследований. Поскольку для выполнения и редукции, и адаптации моделей, разработанных в рамках специальных областей знания и в интересах этих областей, необходимо привлечение как разработчиков этих моделей, глубоко понимающих их научную содержательность, так и специалистов по проектированию, обладающих информацией и знаниями в области разработки синтетических моделей. Правильная организация творческого взаимодействия этих специалистов является основой успеха в создании моделей определения главных элементов корабля.

Таким образом, рассмотрев некоторые особенности, характеризующие содержание обратной задачи, можно перейти к более строгой ее формулировке и постановке.

Пусть существует неограниченное множество моделей, характеризующих корабль в терминах прямой задачи  $\{M\}$ , и определено некоторое ограниченное подмножество  $\{M'\}$  этого множества:  $\{M'\} \subseteq \{M\}$ , позволяющее формировать вектор характеристик  $y$ , достаточный с нашей точки зрения для создания образа корабля. Пусть также существует вектор элементов проекта корабля  $x$ , связанный с вектором  $y$  множеством функций  $\{F_i\}$ , составляющих содержание подмножества прямых задач  $\{M'\}$ . Требуется найти вектор  $x^*$ , как значение зависимой переменной некоторой обратной  $\{F_i\}$  функции  $F_i$  в точке, отвечающей значению ее аргумента  $y^*$ .

Говорят, что обратная задача проектирования, сформулированная выше, задается парой

$$(y^*, F_i(x, y)) \quad (6.11)$$

где вектор  $y^*$  называется заданием на проектирование, а  $F_i(x, y)$  — модельной функцией или просто моделью. Решением задачи, заданной парой (6.11), называется вектор  $x^*$ , удовлетворяющий уравнению

$$F(x^*, y^*) = 0. \quad (6.12)$$

В заключение этого параграфа необходимо отметить, что выполненная выше постановка достаточно традиционна для задач функционального анализа. Вместе с тем при решении обратной задачи проектирования большое значение имеет геометрический образ корабля, при создании которого не всегда можно обойтись без графических средств. Придавание геометрических свойств решению заметно влияет на общую постановку задачи, однако это направление еще только зарождается и не обрело достаточно развитой теоретической базы. Поэтому вопросы, связанные с геометрическими решениями, будут рассмотрены нами отдельно.

### 6.3. СОДЕРЖАНИЕ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛАВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОРАБЛЯ

Как было показано в предыдущем параграфе, обратная задача проектирования, представляющая собой задачу определения главных элементов корабля, задается парой  $(x^*, F(x))$  (такая запись получается при переобозначении переменных в функции в выражении (6.11)), поэтому ее содержание полностью раскрывается описанием элементов этой пары.

Под вектором  $x^*$  мы понимаем числовой ряд конечной длины, представляющий значениями характеристик корабля, заданных перед решением задачи в качестве независимых переменных  $x$ . Поскольку при решении обратной задачи рассматривается только одно конкретное значение вектора  $x$ , то математическая природа его компонентов уже не имеет значения. Достаточно иметь в виду, что эти компоненты могут принимать только положительные значения в силу специфики физического содержания задачи. Иногда помимо значений вектора  $x$  рассматривается еще один вектор значений параметров  $- \theta$  [381], компоненты которого задаются либо в соответствии с общими и специальными требованиями к проектированию корабля, либо на основании анализа прототипов. либо, наконец, из интуитивных соображений. По существу, совокупность векторов  $x$  и  $\theta$  представляет собой входную информацию обратной задачи.

Вместе с тем, предполагая, что описываемая модель в дальнейшем будет использоваться для оптимизации компонентов вектора  $x$ , мы всегда будем рассматривать их отдельно от параметров, входящих в вектор  $\theta$ .

С общетеоретической точки зрения и в качестве компонентов вектора  $x$  могут выступать любые переменные, входящие в искомую математическую модель. Однако на практике это далеко не так. Во-первых, поскольку речь идет только об этапе исполнительского проектирования, выполнение которого в основном осуществляется заказывающими организациями, математический образ корабля, как правило, создается в виде функции параметров таких элементов, которые непосредственно характеризуют его будущие свойства. Этими элементами для боевого корабля являются комплексы корабельного оружия и вооружения. Поэтому в качестве вектора  $x$  чаще всего выступают либо параметры оружия и вооружения корабля, либо просто их общая масса (местность), т. е. боевая нагрузка.

Другое ограничение на выбор компонентов вектора  $x$  связано с необходимостью иметь модель корабля, позволяющую получить его физически содержательный образ в достаточно широком диапазоне изменения вектора  $x$ . В качестве примера, иллюстрирующего выказанное положение, может служить случай, когда в процессе выполнения исследований возникает, например, потребность выяснить, как влияет на основные характеристики подводной лодки (ПЛ) изменение ее расчетной глубины погружения. Вычисление глубины погружения пл в число компонентов вектора  $x$  существенно ограничивает возможность применения математической модели, поскольку, начиная с некоторой значений этой величины, технически уже невозможно создать подводную лодку в радиусе конуса ее погружения. Понятно, что если разработчик ставит целью построить достаточно универсальную и надежную модель, он стремится избавиться от такого рода переменных. Тем не менее, в отдельных задачах специального характера они все же используются, но при этом всегда оговаривают возможные пределы их изменения.

Рассматривая модельную функцию  $F(x)$ , необходимо прежде всего обратить внимание на ее математическую структуру: пред-

ставляет ли она собой алгебраическое или трансцендентное уравнение, систему уравнений или, возможно, вообще разомкнутую структуру. Причем, если речь идет об алгебраическом уравнении или системе таких уравнений, то важно знать, существуют ли реальные пути его (их) решения. Если функция  $F(x)$  трансцендентна, то обладают ли сходимость организуемые для ее решения итерационные процедуры. Наконец, если задача не имеет точного решения, то необходимо выяснить, насколько близко к реальным могут находиться получаемые за конечное число шагов результаты.

Нередко задача построения функции  $F(x)$  описывается в достаточно общем виде. Так ее видел В. Л. Поздняков [276], когда представлял определение главных элементов корабля как результат решения развитой системы уравнений вида

$$\begin{cases} f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = k_i, & i \in I \\ F_j(k_1, k_2, \dots, k_m) = 0, & j \in J \end{cases} \quad (6.13)$$

Подобно системе (6.13) представляют решение задачи по определению характеристик проектируемого летательного аппарата и авторы работы [126]. Вместе с тем в теории проектирования почти не встречаются системы уравнений типа (6.13), содержащие более двух уравнений. И это явление имеет свои причины. Дело в том, что увеличение числа уравнений в системе оказывает на задачу двойное действие: повышает точность ее решения за счет учета большего числа обобщенных переменных и увеличивает трудоемкость решения из-за растущего числа охватываемых итерационных шагов. При этом, если трудоемкость задачи растет экспоненциально, то точность почти сразу же перестает повышаться в силу низкой достоверности исходной информации, порождаемой неопределенностью самой задачи. Во многом этим последним обстоятельством вызывается распространение в проектных заведениях, составляющих функцию  $F(x)$ , относительно простых соотношений.

Таким образом, формирование модельной функции  $F(x)$  обычно осуществляется в процессе решения ограниченного (одного-трех) числа уравнений, компонентами которых являются

лишь фрагменты математической модели проектируемого корабля, а в качестве неизвестных выступают обобщенные переменные типа  $x$ . Одной из наиболее распространенных характеристик этого типа является весовое водонемещение корабля. Представляя собой величину, замыкающую массы возможных элементов проектируемого корабля, водонемещение выступает как очень удобная обобщенная переменная. Действительно, массы любых частей строящегося корабля легко и точно могут быть измерены и учтены, что дает надежную основу для разработки будущего проекта. Поэтому подавляющая часть известных методов определения главных элементов основана именно на решении уравнения масс (иногда его называют уравнением масс — плаучести). В общем случае оно имеет следующий вид:

$$\sum_i m_i = D = \gamma \delta L B T, \quad i \in I, \quad (6.14)$$

где  $m_i$  — масса  $i$ -го элемента разбиения корабля;  $D$  — массовое водонемещение корабля;  $\gamma$  — удельный вес воды (обычно на ранних стадиях проектирования принимается равным 1);  $\delta$  — коэффициент обшивки полноты корпуса;  $L, B, T$  — длина, ширина и осадка корабля соответственно (обычно по КВЛ).

Как правило, в качестве неизвестной величины в уравнении (6.14) выступает водонемещение. Само уравнение (6.14) может быть алгебраически разрешимо относительно  $D$  или разрешаться путем организации итерационного цикла. Позже будет показано, что на алгебраическую разрешимость уравнения (6.14) оказывают влияние два фактора — это сложность модельных зависимостей, входящих в левую часть (6.14) и их количество

$$m_i = m_i(D), \quad (6.15)$$

и информационная технология формирования, хранения, компьютерной и представления в задаче этих модельных фрагментов.

Долгое время (наверное, до середины 50-х годов) представление модельной функции в виде уравнения (6.14) вполне удовлетворяло потребностям практики проектирования. Однако, начиная с этого времени, положение дел изменилось. Основными причинами, вызвавшими эти изменения, были уменьшение

плотности оружия и вооружения, размещаемого на надводных кораблях, и изменение взглядов на вопросы их обитаемости, в какой-то степени возмещение на образование дефицита внутренних объемов и площадей корабельных помещений. В свою очередь уменьшение плотности оружия и вооружения было связано с внедрением на корабле радиоэлектроники, ракетной техники, а впоследствии и корабельной авиации. Отмеченные обстоятельства привели к тому, что решающее место в задаче определения главных элементов стало занимать не уравнение масс, а условия, обеспечивающие удовлетворение потребностей вместимости проектируемого корабля. Для формализации этих условий и определения удовлетворяющих им главных элементов проекта существуют различные пути. Один, кажущийся наиболее очевидным, это определение главных элементов из уравнения вместимости, подобного (8.14):

$$\sum_j v_j = V, \quad j \in (J). \quad (8.16)$$

Здесь  $v_j$  — потребные объемы (или площади)  $j$ -го элемента, разработанная корабль;  $V$  — фактическая вместимость внутренних помещений.

В этом случае подразумевается, что уравнение (8.16) заменит собой уравнение (8.14). Однако при более пристальном анализе означенного пути он оказывается бесперспективным. Дело в том, что в отличие от массовых характеристик характеристика вместимости (потребные площади, объемы и т. п.) не могут быть достаточно точно измерены, не имеют такой статистической устойчивости, как разделы нагрузки масс, а кроме того, плохо поддаются вычлещению из внутреннего пространства корабля. Действительно, к какому разделу "электрооборудование" или "общекорабельные системы" следует отнести объем помещений, где размещается оборудование, относящееся к тому, и к другому разделу? Или другой пример, каким образом следует учитывать потребный объем кабельных трасс и трубопроводов, прокладываемых во всех помещениях корабля? Отмеченные особенности заметно снижают возможную точность определения главных элементов корабля на основе уравнения (8.16).

Гораздо более приемлемым может считаться подход, когда определение главных элементов корабля происходило бы в результате совместного решения уравнений масс и вместимости как системы вида

$$\left. \begin{aligned} \sum_i m_i &= D, \quad i \in (I) \\ \sum_j v_j &= V, \quad j \in (J) \end{aligned} \right\} \quad (8.17)$$

При этом несоответствие точности определения компонентов первого и второго уравнения может быть устранено за счет введения различной точности вычисления их корней. Этот путь реализуется сегодня в теории проектирования, и позже нами будут рассмотрены методы решения системы (8.17).

Говоря о необходимости усложнения задачи от одного уравнения (8.14) до системы типа (8.17), необходимо отметить, что такое направление стало актуальным в результате внедрения в исследовательское проектирование многовариантных методов исследования. Если бы определение главных элементов проекта всегда проводилось в условиях существования достаточно близкого прототипа, то точность их определения на основе уравнения масс по-прежнему была бы удовлетворительной. Неадекватность методов, основанных на решении уравнения масс, становится заметной только при достаточном удалении проектируемого корабля от прототипа, что имеет место как раз при многовариантных исследованиях.

Продолжая раскрывать содержание модельной функции  $F(x)$ , нельзя не обратить внимание на то, что такая точность решений, которая могла бы быть получена на основе уравнения (8.16) или системы уравнений (8.17), о чем говорилось выше, в значительной степени связана с неоправданным упрощением самого понятия вместимости. Традиционно под вместимостью корабля принято понимать "суммарный объем и суммарную площадь всех помещений и отсеков, размещенных в корпусе корабля по верхнюю открытую палубу и закрытых помещениях надстроек..." [286]. Такое толкование выделено только на реализацию аналитической учета вместимости и не затрагивает очевидных аспектов этого понятия. Так, в результате реше-

ния уравнения совместности могут быть определены главные элементы корабля, удовлетворяющие суммарному потребному объему насыщения внутренних помещений корабля, но не обеспечивающие его размещение по какому-либо линейному размеру, например, ширине. Для того чтобы учесть это обстоятельство, потребуется сформулировать дополнительные условия, обеспечивающие размещение необходимого оборудования внутри корабля по всем линейным размерам. Нетрудно заметить, что такая задача вплотную подводит нас к проблеме общего расположения. Однако для того чтобы можно было увидеть всю сложность этой задачи, следует упомянуть и о том, что элементы оборудования, размещаемые на корабле, а также отдельные помещения или отсеки помимо того, что для них должны быть выполнены условия совместности по линейным размерам, объемам и площадям, находятся между собой в определенных отношениях, которые существенно ограничивают возможности по их компоновке внутри корпуса и надстроек. Например, системы с авиационным топливом нельзя располагать в непосредственной близости от погребов боезапаса, а ходовой мостик не следует размещать внутри корпуса корабля. Таких примеров можно привести множество. Все они говорят о сложности задачи и заставляют искать новые пути, с одной стороны, обеспечивающие решение задачи определения главных элементов корабля, а с другой — разрешимость ее в виде системы уравнений. Попытки решить эту задачу осуществляются сегодня в рамках таких развивающихся разделов теории исследовательского проектирования, как моделирование архитектурно-компоновочных решений и принятие решений в задачах ситуационного выбора. Дальнейшая разработка этого направления, по-видимому, связана с проблемой создания средств искусственного интеллекта.

## Глава 7. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СИНТЕЗА КОРАБЛЯ

### 7.1. МАССОВЫЕ МОДЕЛИ СИНТЕЗА КОРАБЛЯ

Под массовыми моделями синтеза корабля, или говоря более традиционно — массовыми моделями определения его главных

элементов, понимается модельная функция типа  $F(x)$ , структурно представляющая собой уравнение вида (6.14). Физическая суть этого уравнения заключается в том, что сумма масс плавающего корабля равна его массовому водоизмещению и в соответствии с законом Архимеда уравновешивается силами плавучести. С вычислительной точки зрения это уравнение представляет собой обратную задачу проектирования и, как это отмечалось раньше, для своего разрешения требует определенного объема входной информации. Обычно такая информация получается в результате статистической обработки данных одного или серии проектов. Для облегчения этой работы и упорядочения анализа содержащихся проектов используется разрабатываемая в основном в целях уже более поздних стадий создания корабля так называемая "нагрузка масс корабля" — отраслевой отчетный документ, входящий в перечень представляемых материалов проекта. Нагрузка масс предусматривает разбиение массы корабля по принципу выделения таких его элементов, функции которых отличаются достаточной определенностью, а масса — отдельностью от других элементов. При этом массовое водоизмещение делится на разделы, группы и подгруппы в соответствии с действующей нормалью.

Математические модели, построенные на основе уравнения масс, являются наиболее разработанными в задаче синтеза и чаще всего используются для определения главных элементов корабля на разных стадиях проектирования. Этому способствует хорошая измеримость и контролируемость масс, а также большой опыт накопления и обработки информации о разделах нагрузки. В то же время следует всегда различать большую инженерно-конструкторскую и нормативную работу, проводимую с нагрузкой масс в процессе разработки проекта корабля, от исследовательских работ, связанных с созданием массовых математических моделей. Последние имеют ряд специфических особенностей. Прежде всего, при разработке модельных функций, связывающих главные элементы корабля с массами тех или иных разделов нагрузки, наиболее важное место занимает поиск закономерностей, отражающих физическую сущность моделируемых объектов. Необходимость создания именно таких моделей вы-

знана тем, что статистический материал, который можно получить при обработке нагрузок масс различных проектов, представляет собой так называемые предельно малые выборки, так как количество проектов, которые можно было бы рассматривать в качестве аналогов будущего корабля, не велико (10—12), и их становится еще меньше, если учитывать то время, когда выполнялись эти разработки. Другой причиной, заставляющей обращаться при моделировании разделов нагрузки масс пристальное внимание на их содержательную сторону, является использование этих моделей для определения главных элементов проектов, значительно удаленных от своих прототипов (особенно это актуально в задачах оптимизации). Для того, чтобы модель продолжала оставаться полезной, необходимо использовать в ней зависимости, достаточно устойчивые по отношению к имеющемуся статистическому материалу, а этим свойством обладают именно "физические" модели.

При всей актуальности разработки физически содержательных моделей далеко не все массовые модели одинаково развиты в этом отношении. Это связано с двумя обстоятельствами. Во-первых, вклад различных разделов нагрузки масс в водоизмещение корабля различен. Так, относительное значение массы раздел "корпус" колеблется в пределах от 38 до 44, а иногда и более процентов от водоизмещения корабля. Эти же величины применительно к таким разделам нагрузки, как "системы", "машины и грузы", "снабжение" и другие, обычно не превышает 5%. Ошибки, которые могут быть допущены при определении масс как тех, так и других разделов, по разному сказываются на величине водоизмещения, и, следовательно, с различной степенью подробности должны разрабатываться алгоритмы расчета этих масс. Поэтому в практике исследовательского проектирования, исходя из интуитивно понятной точности разрабатываемых массовых моделей, условно разделяют так называемые "значимые" и "малозначимые" разделы нагрузки масс (например, в моделях первого приближения считается, что к малозначимым относятся все разделы с относительным вкладом в водоизмещение 5% и менее).

Другой причиной, ведущей к неоднородной развитости компонентов массовой модели, является проблемно-ориентированный характер задач исследовательского проектирования. В соответствии с методологией этих задач синтез корабля, в данном случае определение его главных элементов, осуществляется в интересах исследования некоторой актуальной проблемы, выдвинутой практикой. Необходимость детализировать именно те аспекты модельных элементов, которые могли бы позволить более ясно представить содержание решаемой проблемы, и ведет к неравномерному распределению сложности в модели.

Независимо от степени разработанности тех или иных фрагментов массовой модели общее количество составляющих ее компонентов как правило значительно меньше, чем это предусматривается действующей нормативой. Так по ОСТ В5-0205-77 предусматривается 19 разделов, в каждом из которых от 5 до 13 групп и, разумеется, намного больше статей. В массовых же моделях общее число выделяемых элементов не превышает обычно двадцати. Это связано как с тем, что задачи исследования требуют акцентировать внимание исследователя как правило не более, чем на 3—4 фрагментах, так и относительно низкой точностью моделей синтеза вообще и массовых моделей, разрабатываемых на ранних стадиях проектирования, в частности. Традиционно разделы, составляющие массовую модель, называются "укрупненной нагрузкой масс". Наиболее часто употребляемыми из них являются разделы, входящие в правую часть приведенного ниже уравнения масс.

$$D = P_{\text{к}} + P_{\text{в}} + P_{\text{о}} + P_{\text{м}} + P_{\text{с}} + P_{\text{г}} + P_{\text{э}} + P_{\text{т}} + P_{\text{сн}} + P_{\text{з}} + P_{\text{ш}} + P_{\text{зщ}} \quad (7.1)$$

где  $P_{\text{к}}$  — масса корпуса;  $P_{\text{в}}$  — масса вооружения;  $P_{\text{о}}$  — масса боеприпаса;  $P_{\text{м}}$  — масса главной энергетической установки (ГЭУ);  $P_{\text{с}}$  — масса запаса топлива для ГЭУ;  $P_{\text{г}}$  — масса электроэнергетической системы корабля (ЭЭСК);  $P_{\text{э}}$  — масса запаса водоизмещения;  $P_{\text{т}}$  — масса объектороботных систем и устройств;  $P_{\text{сн}}$  — масса снабжения;  $P_{\text{з}}$  — масса жидких грузов;  $P_{\text{зщ}}$  — масса защиты.



В зависимости от степени разработанности массовых моделей или языка оговора, различного уровня их адекватности моделируемым объектам, обычно различают модели первого и второго приближения. В последнее время эта терминология несколько изменилась: чаще стали рассматривать также так называемое "нулевое" приближение, а в связи с созданием систем автоматизированного проектирования можно встретить и такую классификацию, когда каждой степени разработанности модели отвечает свой вариант программного модуля. Таким образом, независимо от используемой терминологии из практических соображений оказалось целесообразным различать модели трех типов. При этом модели первого типа (нулевого приближения или 1-й версии) называют только на то, чтобы дать целостное представление о корабле сохраняя постоянными относительный вклад моделируемого объекта в массовое водоизмещение. Метод построения таких моделей получил название метода проектирования, а сами модели отвечают выражению вида:

$$P_i = \varphi \cdot \frac{D}{100} \quad (7.2)$$

где  $\varphi$  — относительная доля, зависящая моделируемым разделом нагрузки в массовом водоизмещении корабля  $D$  в процентах, а  $P_i$  — масса моделируемого раздела (в тоннах).

Значения коэффициентов типа  $\varphi$ , а выражения (7.2) могут быть получены из выражения вида

$$\varphi = \frac{P_i^0}{D^0} 100, \quad (7.3)$$

При этом под значениями  $P_i^0$  и  $D^0$  могут пониматься как проектные характеристики какого-либо существующего корабля, так и результат статистической обработки семейства прототипов.

Если массовая модель корабля состоит только из моделей разделов нагрузки масс типа (7.2), то задачи определения водоизмещения корабля решается с помощью одного выражения типа:

$$D = \frac{P_{\Sigma}}{P_{\Sigma}^0} D^0, \quad (7.4)$$

где  $P_{\Sigma}$ ,  $P_{\Sigma}^0$  — массы вооружения и боезапаса, то есть "полезная нагрузка",  $D$  и  $D^0$  — массовые водоизмещения проектируемого корабля и прототипа соответственно.

Задача определения главных элементов корабля методом проектирования завершается определением его главных размеров в предположении частного геометрического подобия корпуса проекта некоторому (некоторым) прототипу, то есть:

$$\lambda = \frac{L^3}{B^3}; \quad \tau = \frac{H^3}{T^3}; \quad l = \frac{H^3}{T^3}, \quad (7.5)$$

где  $H$  — высота корпуса корабля на миделе.

Тогда, исходя из уравнения плавучести

$$D = \delta LBT$$

и принимая здесь и повсюду в дальнейшем удельный вес воды  $\gamma = 1 \text{ т/м}^3$ , получим выражение для длины корабля

$$L = \sqrt[3]{\frac{D \lambda^2 \tau}{\delta}} \quad (7.6)$$

а затем и другие главные размерения в соответствии с выражением (7.5).

Математические модели второго типа (следующей версии) предполагают раскрытие в той или иной степени физической сущности моделируемого свойства или объекта. Здесь можно различать модели, позволяющие непосредственно и интуитивно ясно интерпретировать их физическую содержательность. А также модели, представляющие собой ту или иную степень редукции формализации соответствующих предметных областей.

В качестве примера моделей первого типа можно предложить широко используемую зависимость для определения массы корпуса корабля

$$P_{\text{ст}} = q_{\text{ст}} L B H, \quad (7.7)$$

где  $L B H$  — так называемый кубический модуль корпуса;  $q_{\text{ст}}$  — результат статистической обработки протолима.

Физическое содержание выражения (7.7) раскрывается через представление корпуса в виде некоторого параллелепипеда с размерами, отвечающими главным размерам проектируемого корабля. Адекватность этой модели находит интуитивно ясное подтверждение в том простом соображении, что с ростом любого линейного размера неизбежен и рост массы корпуса. Модели рассматриваемого типа просты, их поведение в процессе вычисления легко контролируется, кроме того, для информативного заполнения этих моделей не требуется большого количества исходных данных.

Дальнейшее усложнение массовых моделей приводит к необходимости вводить вторую их тип. Как уже отмечалось, это модели, получаемые в результате редукции более сложных моделей анализа, разработанных ранее в той или иной предметной области. Пути и методы редукцирования математических моделей в интересах задач проектирования составляют самостоятельный раздел дисциплины. Здесь же можно только сказать, что успех в редукцировании определяется в основном двумя обстоятельствами: глубиной знания предметной области и пониманием целей и специфики проектных задач. При этом знание предметной области необходимо для определения возможных путей упрощения и упрощения модели, то есть собственно редукции. Понимание же вопросов проектирования позволяет правильно определить состав переменных модели (иногда говорят, выделить алгоритмически переменных) и объем входной информации. Здесь же следует заметить, что если такая работа осуществляется в области, достаточно далеко отстоящей от границ профессиональных знаний исследователя-проектиратора, то для ее выполнения необходимо решить также ряд организационных вопросов, связанных с привлечением соответствующих специалистов и организацией их взаимодействия на период разработки модели.

Одним из примеров воссоздания массовых моделей второго типа может служить эмпирическая зависимость, разработанная профессором Цуцшивером А. Э. для определения массы корпу-

са корабля. Общее рассуждение при ее выводе проводится следующим образом.

Изгибающий момент при постановке корабля на волну равен

$$M_{\text{изм}} = \frac{D L^3}{K_{\text{изм}}}, \quad (7.8)$$

где  $K_{\text{изм}}$  — коэффициент изгибающего момента.

Тогда допускаемые нормальные напряжения в крайних фиорах мидельового сечения определяются из выражения:

$$\sigma_{\text{изм}} = K_{\text{ст}} \sigma_{\text{ст}} = \frac{M_{\text{изм}}}{W}, \quad (7.9)$$

где  $K_{\text{ст}}$  — коэффициент запаса прочности;  $\sigma_{\text{ст}}$  — предел текучести материала;  $W$  — момент сопротивления эквивалентного бруса корабля, который можно представить в виде зависимости его от площади поперечного сечения  $F$ :

$$W = 0,5 \eta H F, \quad (7.10)$$

где  $\eta$  — коэффициент утилизации профиля.

При этом масса продольных связей корпуса корабля может быть записана следующим образом

$$P_{\text{св}} = \gamma_{\text{м}} \psi L, \quad (7.11)$$

где  $\gamma_{\text{м}}$  — удельный вес материала;  $\psi$  — коэффициент заострения, учитывающий уменьшение сечения продольных связей к оконечностям корабля.

Подстановка (7.8), (7.9) и (7.10) в выражение (7.11) и предпологая, что масса корпуса прямо пропорциональна массе продольных связей, получим выражение для массы корпуса корабля

$$P_{\text{ст}} = 2 \psi_{\text{ст}} \psi \eta_{\text{ст}} \frac{D L^3}{K_{\text{изм}} K_{\text{ст}} \sigma_{\text{ст}} H \eta}, \quad (7.12)$$

где  $\psi_{\text{ст}}$  — коэффициент пропорциональности.

Обозначая все величины, входящие в правую часть выражения (7.12) и не являющиеся главными элементами корабля,  $Q_{\text{ст}}$  и

включив в этот коэффициент  $L$  для его обезразмеривания (с целью придания  $Q_{cr}$  большей статистической устойчивости), окончательно получим

$$P_{cr} = Q_{cr} \frac{M}{H} \quad (7.13)$$

Выражение (7.13) и представляет собой формулу А. Э. Дукшвердта. Говоря о редуцировании моделей задачи синтеза, необходимо вернуться к одному важному обстоятельству, уже рассмотренному нами в параграфе 5.2. В нем шла речь о том, что на формирование той или иной проектной модели оказывают влияние не менее двух противоречивых факторов. Это объясняется компромиссным характером всего процесса проектирования. Можно даже сказать, что в этом и заключается его суть. Когда модель, в данном случае массовая модель, создается на уровне интуитивно ясного понимания ее механизма, как, например, в случае, отвечающем выражению (7.7), действие противоречивых факторов взаимнокомпенсируется, обеспечивая устойчивость модели. При разработке редуцированных моделей нередко возникает ситуация, когда моделируется только один какой-либо фактор, что приводит к нарушению сложившегося баланса. Одним из примеров такого моделирования может служить выражение (7.13). Здесь при построении модели использовались результаты теории строительной механики корабля. В соответствии с этой теорией с увеличением высоты эквивалентного бруса (высота корпуса корабля  $H$ ) растет момент сопротивления и, следовательно, уменьшается масса продольных связей. В конечном счете становится меньше масса корпуса корабля в целом. Однако в практическом проектировании этот вывод не подтверждается, так как с увеличением высоты борта растут затраты материалов на обшивку, а также обеспечение местной прочности и устойчивости элементов набора корпуса. При этом толщина листов продольного набора и обшивки корпуса, которые могли бы быть уменьшены в соответствии с выражением (7.13), на самом деле остаются в пределах, определенных соображениями коррозионной стойкости, долговечности и местных нагрузок. В результате с ростом высоты борта корабля

масса его корпуса почти всегда растет. Поэтому при разработке редуцированных моделей необходимо внимательно изучать действие противоречивых факторов, оставляя в результате редуциции не менее двух из них, если только, конечно, сам процесс не носит монотонный характер.

Данная выше классификация массовых моделей не является единственной. Так, довольно часто характеризуют модели третьего типа, то есть модели, наиболее глубоко погруженные в предметную область, их различают по виду используемых модельных зависимостей: аналитические (одночленные и многочленные) и алгоритмические, то есть использующие алгоритмические представления графиков, номограмм, таблиц и т. п., а также элементы логики в виде ветвящихся алгоритмов.

В качестве примера аналитической многозначной зависимости можно привести пример массовой модели электроэнергетической системы корабля:

$$P_{эл} = P_{эл} + P_{от} \quad (7.14)$$

где  $P_{эл}$  — масса источников электроэнергии и главных распределительных щитов (ГРЩ);  $P_{от}$  — масса электротрасс, отсечных и иных распределительных щитов.

По своей физической сущности элементы, входящие в правую часть выражения (7.14) различны, причем если источники электроэнергии и ГРЩ представляют собой относительно сосредоточенные массы, зависящие от мощности источников тока и числа электростанций, то вторая составляющая этого выражения является строго распределенной величиной. Поэтому для раскрытия (7.14) довольно часто используют выражения

$$\begin{aligned} P_{эл} &= q_{эл} N_{эл}; \\ P_{от} &= q_{от} L B H, \end{aligned} \quad (7.15)$$

где  $N_{эл}$  — мощность источников электроэнергии корабля. Что касается алгоритмических моделей, то необходимость в них возникает уже при самой первой попытке усложнения. Это связано с необходимостью смены прототипа при переходе из одной области возможных параметров модели в другую, и с не-

пользованием дискретных переменных, и с применением локальных аппроксимаций.

Наиболее характерным примером алгоритмизации массовой модели является использование диаграмм. Так, для определения массы главной энергетической установки вернее используется следующее выражение:

$$P_m = \rho_m WPS, \quad (7.16)$$

где  $WPS$  — мощность полного хода главной энергетической установки корабля на валу (т. е.).

Последняя, в свою очередь, определяется через буксирную мощность ( $EPS$ ) и пропульсивный коэффициент  $\rho_p$ :

$$WPS = \frac{EPS}{\rho_p}, \quad (7.17)$$

а буксирная мощность может быть определена по формуле Э. Палмера

$$EPS = \frac{Dx}{L\lambda} \sqrt{\psi} \frac{v^2}{c_v}, \quad (7.18)$$

где  $\lambda$  — коэффициент, зависящий от числа валов и учитывающий влияние выступающих частей;  $\lambda = 0,7 + 0,3\sqrt{L/100}$  — поправочный множитель ( $\lambda = 1$ ,  $L \geq 100$ );  $\psi$  — коэффициент продольной остроты корпуса (следует оценивать от коэффициентов продольной и вертикальной полноты и, %);  $c_v$  — коэффициент, определяемый по диаграмме Э. Палмера в зависимости от коэффициента  $\psi$  и относительной скорости  $v^*$ ,

$$v^* = v\sqrt{\psi/L}.$$

Диаграмма Палмера имеет следующие пределы применимости

$$\psi = [0,35 + 1,1]; \quad \frac{B}{T} = [1,5 + 3,5]; \quad \frac{L}{B} = [4 + 11]; \quad \delta = [0,35 + 0,8]$$

и может быть введена в расчет в виде матрицы, сопровождаемой интерполяционной процедурой, которая и придает всей модели алгоритмический характер.

Завершая описание подходов к построению массовой модели синтеза, необходимо отметить, что для этих моделей в модели синтеза вообще предельным случаем их усложнения является представление фрагмента модели более высокого уровня (системы) в виде новой системы, но уже более низкого уровня. Так, применительно к только что рассмотренной модели определения массы главной энергетической установки это замечание будет выражаться в необходимости представления главной энергетической установки в виде самостоятельного объекта синтеза так, как это до сих пор делалось относительно самого корабля. При этом массовая модель такой системы станет многоэлементной и каждый ее фрагмент необходимо будет снова моделировать с учетом всех ранее высказанных соображений.

#### Пример. Определение главных элементов корабля на основе решения уравнения масс

##### Исходные данные задачи

Характеристики прототипа:  $L^0$  — длина;  $B^0$  — ширина;  $T^0$  — осадка;  $H^0$  — высота борта;  $D^0$  — водоизмещение;  $P_{\text{к}}^0$  — масса корпуса;  $P_{\text{с}}^0$  — масса снабжения;  $P_{\text{в}}^0$  — масса запаса водоизмещения;  $P_{\text{э}}^0$  — масса электрооборудования;  $P_{\text{с}}^0$  — масса систем;  $P_{\text{г}}^0$  — масса жидких грузов;  $P_{\text{м}}^0$  — масса механической установки;  $P_{\text{т}}^0$  — масса топлива;  $P_{\text{з}}^0$  — масса защиты;  $v_{\text{пх}}^0$  — скорость полного хода;  $WPS_{\text{пх}}^0$  — полная мощность ГЭУ;  $v_{\text{э}}^0$  — скорость экономического хода;  $WPS_{\text{э}}^0$  — мощность ГЭУ экономического хода.

Характеристики проектируемого корабля:  $v_{\text{пх}}$  — скорость полного хода;  $v_{\text{э}}$  — скорость экономического хода;  $P_{\text{пл0}}$  — масса контура ПЛО;  $P_{\text{пво}}$  — масса контура ПВО;  $P_{\text{плв}}$  — масса

контура УРО;  $P_{\text{н.н.}}$  — масса неварируемого вооружения;  $q_{\text{т.т.}}$  — удельный расход топлива;  $R$  — дальность плавания;  $\delta$  — коэффициент полноты корпуса;  $t_{\text{ср}}$  — среднее значение отношения высоты борта к осадке;  $e_p$  — норма точности по водоизмещению.

Расчет массовой модели корабля

Определение полезной нагрузки

$$P_{\text{н.п.}} = P_{\text{п.н.}} + P_{\text{п.л.}} + P_{\text{у.р.}} + P_{\text{м.л.}}$$

Определение водоизмещения в 1-м приближении

$$D = 4P_{\text{н.п.}}$$

Вычисление главных размеров

$$\lambda = L^2/B^2; \quad \tau = B^2/T^2;$$

$$L = \sqrt{\frac{D\lambda^2\tau}{\delta\gamma}}; \quad B = L\lambda; \quad T = B/\tau;$$

$H = t_{\text{ср}}T$  — приведенная высота борта.

Вычисление массы корпуса

$$P_{\text{к.т.}}^0 = P_{\text{к.т.}}^0 L^2 B^2 H^2;$$

$$P_{\text{к.т.}} = P_{\text{к.т.}}^0 L B H.$$

Вычисление массы снабжения

$$P_{\text{с.н.}}^0 = P_{\text{с.н.}}^0 D^2; \quad P_{\text{с.н.}} = P_{\text{с.н.}}^0 D.$$

Вычисление массы запаса водоизмещения

$$P_{\text{в.з.}}^0 = P_{\text{в.з.}}^0 D^2; \quad P_{\text{в.з.}} = P_{\text{в.з.}}^0 D.$$

Вычисление массы электрооборудования

$$P_{\text{э.о.}}^0 = P_{\text{э.о.}}^0 D^2; \quad P_{\text{э.о.}} = P_{\text{э.о.}}^0 D.$$

Вычисление массы систем

$$P_{\text{с.т.}}^0 = P_{\text{с.т.}}^0 D^2; \quad P_{\text{с.т.}} = P_{\text{с.т.}}^0 D.$$

Вычисление массы живых грузов

$$P_{\text{ж.г.}}^0 = P_{\text{ж.г.}}^0 D^2; \quad P_{\text{ж.г.}} = P_{\text{ж.г.}}^0 D.$$

Вычисление адмиралтейского коэффициента полного хода

$$C_{\text{п.л.}} = (D^2)^{0,25} (v_{\text{п.л.}}^0)^3 / WPS_{\text{п.л.}}^0.$$

Вычисление полной мощности ГЭУ

$$WPS_{\text{п.л.}} = D^{2,25} v_{\text{п.л.}}^3 / C_{\text{п.л.}}$$

Вычисление массы ГЭУ

$$P_{\text{г.у.}}^0 = P_{\text{г.у.}}^0 / WPS_{\text{п.л.}}^0; \quad P_{\text{г.у.}} = P_{\text{г.у.}}^0 WPS_{\text{п.л.}}$$

Вычисление адмиралтейского коэффициента экономичности хода

$$C_{\text{э.х.}} = (D^2)^{0,25} (v_{\text{э.х.}}^0)^3 / WPS_{\text{э.х.}}^0.$$

Вычисление мощности ГЭУ экономичного хода

$$WPS_{\text{э.х.}} = D^{2,25} v_{\text{э.х.}}^3 / C_{\text{э.х.}}$$

Вычисление массы топлива

$$P_{\text{т.}} = \frac{1}{2} q_{\text{т.т.}} WPS_{\text{э.х.}} \frac{R}{v_{\text{э.х.}} \cdot 1000};$$

$$q_{\text{т.т.}} = 0,569 \text{ кг/л} \cdot \text{ч.}$$

Вычисление массы защиты

$$P_{\text{з.}}^0 = P_{\text{з.}}^0 D^2; \quad P_{\text{з.}} = P_{\text{з.}}^0 D.$$

Вычисление водоизмещения корабля

$$D_1 = P_{\text{т.}} + P_{\text{к.т.}} + P_{\text{с.н.}} + P_{\text{в.з.}} + P_{\text{с.т.}} + P_{\text{ж.г.}} + P_{\text{г.у.}} + P_{\text{э.о.}} + P_{\text{з.}} + P_{\text{н.п.}}$$

$$D_1 = D_1 - D.$$

Если  $D_2 \leq \epsilon_0$ , то  $D = D_1$ . Если  $D_2 > \epsilon_0$ , то возврат на вычисление массы корпуса.

### 7.2. МОДЕЛИ, ОСНОВАННЫЕ НА СОВМЕСТНОМ РЕШЕНИИ УРАВНЕНИЙ МАСС И ВМЕСТИМОСТИ

Необходимость уже на ранних стадиях проектирования при определении главных элементов корабля учитывать не только условия равновесия сил веса и плавучести, но и условия вместимости проектируемого корабля обусловлена тенденциями, объективно действующими сегодня в военном кораблестроении. Впервые эта тенденция заметилась в начале 60-х годов, и ее появление было связано с развитием сначала ракетного оружия, а затем электронного и авиационного вооружения. Отличительной особенностью этих типов полезной нагрузки являлся значительно меньшая их плотность размещения на корабле ( $\text{т/м}^3$ ) по отношению к ранее традиционному мины-торпедному и артиллерийскому вооружению. Это обстоятельство, а в последствии и ужесточение требований к обитаемости и системам жизнеобеспечения личного состава привели к росту дефицита потребного объема и площади, то есть потребной вместимости надводных кораблей. Какое-то время растущий дефицит удавалось компенсировать развитыми надстройками (что было обусловлено также требованиями расположения радиоэлектронного вооружения как можно ближе к антенным постам). Однако возникшая со временем тенденция размещения оружия преимущественно в корпусе корабля привела к такому дефициту вместимости, что стала нарушаться общая сбалансированность проекта. Поэтому возникла необходимость учета вместимости непосредственно при определении главных элементов корабля и согласовании с уравнением масс.

С точки зрения системного анализа такая постановка задачи является не более, чем наращиванием числа замыкающих переменных, что обеспечивает более адекватный синтез моделируемой системы. В предельном случае можно было бы записать бесконечное число уравнений с бесконечным числом замыкающих переменных. Решение такой системы уравнений относитель-

тельно всех неизвестных позволило бы создать образ корабля, бесконечно близкий к реальному. Однако наращивание числа уравнений неизбежно ведет к усложнению задачи, а возможность получения при этом большой адекватности снижается из-за привлечения все большей исходной информации конечной точности. При этом следует подчеркнуть, что если для уравнения масс в качестве такой информации используются сведения о хорошо измеримых и контролируемых массах подсистем корабля, сбор, обработка и хранение статистических данных о которых ведется уже много десятилетий, то в состав уравнения вместимости будут входить элементы объемов и площадей проекта, классификация которых затруднена, а сбор статистических данных о них выполняется нерегулярно. Например, если рассмотреть помещения, занимаемые главной энергетической установкой, то их объем будет зависеть не только от мощности и возможных габаритов механизмов главной энергетикой, но также и от того, будут ли размещаться в машинном отделении генераторы электроэнергии, компрессоры, опреснители или какое-либо иное вспомогательное оборудование. Выделить же объемы, обеспечивающие размещение только главной энергетической установки, затруднительно — это нарушит сам объективный принцип классификации помещений корабля.

Таким образом, при учете потребного объема машинного отделения в целом потребуются дополнительная информация о размещаемом в нем оборудовании, которой на ранних стадиях проектирования в распоряжении проектанта, как правило, не имеется, что и ведет к снижению точности модели. Адекватность вместимостных моделей снижается также от того, что тот или иной объем, потребовавшийся для размещения какого-либо образца или системы на корабле-прототипе, легко может быть значительно изменен за счет конструкторского решения на проектируемом корабле. Так, если предполагать, что существует статистическая характеристика для помещений главной энергетической установки  $V_{\text{м}} [\text{м}^3/\text{с}]$ , то эта величина может заметно измениться в процессе конструкторской работы по планировке помещений на более поздних стадиях проектирования.

Исходя из сказанного можно заключить, что модели определения главных элементов корабля, основанные на учете вместимости, имеют значительно более низкую (возможно на порядок) точность вычисления, чем массовые модели. Поэтому, если решается задача применительно к кораблю, имеющему достаточно близкий прототип, более адекватной окажется массовая модель. Массово-вместимостная же модель может стать полезной в расчетах, выполняемых при значительно удаленном прототипе, или же при его отсутствии вообще, когда информация о пространственном расположении оборудования корабля, хранящаяся в основном виде в результатах статистической обработки масс прототипа, теряет свой первоначальный смысл.

Учитывая, что предыдущий параграф был полностью посвящен принципам и особенностям построения массовых моделей, а также то, что изложенные при этом соображения в значительной мере распространяются на проблему разработки моделей синтеза вообще, здесь будут даны лишь особенности построения моделей вместимости и выполнен их сравнительный анализ с массовыми моделями.

Основным уравнением, отвечающим условиям вместимости надводного корабля, является равенство его потребных и фактических объемов.

$$V_3 = V_4 \quad (7.19)$$

Можно также говорить об аналогичном равенстве площадей, однако при этом всегда следует ясно представлять, какую дополнительную информацию в результате решения такой задачи мы можем получить. Потому что в обмен на эту информацию потребуется примерно на порядок увеличить затраты машинного времени из-за необходимости создания еще одного охватывающего итерационного цикла. Наиболее заметное отличие уравнений объемов от уравнения площадей обуславливается тем, что все помещения корабля подразделяются по высоте на стандартные и нестандартные. Если бы все помещения корабля имели стандартную высоту (например, междупалубное расстояние), или же, наоборот, все помещения оказались нестандартными, то разница между учетом объемов и площадей свелась бы практически только к дополнительной учету площадей откры-

той части верхней палубы, мостиков и крыш надстроек. Однако сочетание стандартных и нестандартных помещений заставляет отличать условия равенств объемов и площадей. Более того, в отдельных случаях нестандартные помещения могут выступать на уровне своеобразного конструкторского узла, и тогда необходимым станет учет не только площади такого помещения, но и его характерных размеров. Такими помещениями являются машинные отделения на небольших кораблях, ангары авианосущих кораблей, доковые камеры десантных кораблей-доков и т. п. В каждом конкретном случае вопрос об определении значения учета площадей или объемов (а, возможно, все-таки и того и другого) решается исходя из особенностей проекта. Здесь же для методической ясности и не смущая существенно общности рассуждения, можно считать, что речь идет только об уравнении объемов.

Наиболее сложным и привносящим основную ошибку в расчет является определение потребных объемов проектируемого корабля. При этом так же, как и в уравнении масс, нам потребуется ввести определенный принцип разбивки потребного объема корабля на составляющие. В общем случае возможны три подхода к решению этой задачи.

Первый подход реализуется применительно к таким объектам (системам, кораблям), количество элементов размещений которых настолько велико, что позволительно считать каждый из этих элементов на компоновку корабля в целом пренебрежимо малым. Такие системы тогда называют "большими", или "мозаичными". Другим определением больших систем является представление их в виде настолько большой совокупности элементов, что это накопление количества позволяет говорить о возникновении некоторых новых качеств системы. Обобщая понятие "большая система" применительно к крупным популяциям животных, человеческому обществу или инфраструктурам большого масштаба. Однако и в данном нами выше определении, очевидно, существуют признаки большой системы. Примером такой системы может служить многоцелевой надводный корабль большого и среднего водоизмещения. Характерной особенностью большой системы является отсутствие индивиду-

альных признаков у ее элементов. Поэтому разбиение потребного объема корабля в рамках такой модели может быть относительно произвольным и, как правило, тяготеет к какой-то уже существующей структуре. Так, например, возможно разбиение объема на составившие, отвечающие существующей корабельной организации, то есть по боевым частям. Другим широко используемым способом является формирование структуры потребного объема подобно уже приведенной ранее структуре массовой модели. Это делается для облегчения задачи совместного решения уравнений масс и вместимости.

Другой подход к представлению потребных объемов корабля реализуется применительно к так называемым "малым" системам (иногда говорят, "аппаратам"), отличительной чертой которых является наличие в их составе одного или нескольких элементов "узловых" элементов размещения, оказывающих сильное влияние на формирование облика всей системы. Примерами таких систем являются катера, небольшие корабли, подводные лодки. Не следует думать, что малыми системами могут быть представлены только небольшие объекты. Существенно малыми системами являются авианосцы, десантные корабли и другие подобные им системы, чьей характерной особенностью являются конструктивные узлы, сравнимые с кораблем в целом (в данном случае эшир или доковая камера). В других областях техники под понятие "аппарат" подходит самолет, танк, ракета и т. п. В этом случае принцип разбиения объема предполагает прежде всего выделение в самостоятельные элементы характерных конструктивных узлов.

На практике же чаще всего используется третий подход, представляющий собой сочетание первых двух. Так, в соответствии с первым подходом потребный объем корабля представляется подобно уравнению масс

$$V_d = V_{sp} + V_{ms} + V_{ak} + V_{cm} + V_{ca} + V_b + V_{st} + V_{ca} + V_{sa} + V_{sa}, \quad (7.20)$$

где члены, входящие в правую часть, соответствуют разделам, входящим в выражение (7.1).

Если принять во внимание, что в уравнении масс разделы, расположенные левее  $V_{ms}$ , относятся к так называемым значимым разделам нагрузки, а те что расположены правее — к малозначимым, по своему вкладу в массовое водоизмещение корабля, то можно заметить, что уравнение (7.20) не отвечает этому делению. Не затрагивая более тонких вопросов, можно отметить, что объем, занимаемый материалом корпуса корабля, составляет не более 1,5% от его общей вместимости. В то же время, объем, выделенный на обеспечение снабжения и жизнедеятельности экипажа, составляет более 30%. Учитывая эти обстоятельства, уравнение (7.20) примет следующий вид:

$$V_d = V_{ms} + V_{ca} + V_{ak} + V_{cm} + V_b + V_{st} + V_{ca} + V_{sa} + V_{sa} + V_{st} + V_{sa} + V_{sa}. \quad (7.21)$$

Применительно к кораблям, которые мы ныне определили как малые системы, учет узловых элементов размещения в виде значимых членов уравнения (7.21) уже оказывается избыточным. Здесь требуется принципиально иное изменение самого подхода к учету вместимости корабля. На практике такой подход получил название проектирования "от узла". В его основу положено предположение о том, что на корабле необходимо решить задачу размещения только узловых элементов, и этого достаточно, чтобы разместилось все остальное внутреннее насыщение. Характерным примером реализации описанного подхода может служить модель вместимости авианосца. Здесь по сути проверяется два соотношения: условие размещения летательных аппаратов в эшире и на верхней палубе, и высота борта авианосца из условия размещения аппаратуры на таком расстоянии от действующей ватерлинии, которое бы обеспечивало удовлетворение требованиям мореходности и непотопляемости. В других отраслях промышленности принцип проектирования от узла реализуется, например, как формулирование задачи компоновки самолета в виде пары двигатель—планер, или как представление танка световой: "пушка—двигатель—броня". Известно применение этого принципа в ракетной технике [153].



Необходимо подчеркнуть, что ни первый, ни второй подходы к представлению потребных объемов не отвечают на вопрос о определении так называемых, "паразитных объемов": коридоров, тамбуров, коффердамов, сухих отсеков и т. п. Обычно потребный объем этих помещений на ранних стадиях проектирования определяется как некоторая доля от общего потребного объема корабля.

При формировании моделей вместимости, отвечающих компонентам правой части выражения (7.21), также, как и при разработке массовых моделей, предполагается создание различий по глубине и степени разработанности версий таких моделей. При этом характерной особенностью вместимостных моделей является то, что их разрабатывают не отдельно от массовых моделей, а только вместе с ними. Это довольно часто позволяет использовать результаты моделирования уравнения масс. Поэтому самые простые (булевого приближения) вместимостные модели используют понятие "плотности" того или иного фрагмента массовой модели. Например, как уже отмечалось, объем, занимаемый конструкциями корпуса корабля, чья масса составляет около половины массового водонмещения и поэтому определялась достаточно тщательно в массовой модели, не превышает 1,5% от потребной вместимости корабля. Поэтому наиболее естественным является определение этой составляющей уравнения (7.21) в следующем виде

$$V_{\text{ф}} = v_{\text{ф}} P_{\text{ф}}, \quad (7.22)$$

где  $v_{\text{ф}}$  — величина, обратная плотности корпусных конструкций, м<sup>3</sup>/т.

Другая особенность моделей вместимости раскрывается при последовательном усложнении модельных функций. Здесь, в отличие от массовых моделей, понятия редукции и адаптации исходных моделей предметной области не выдвигаются определенными. Результаты, достигнутые в кораблестроительных дисциплинах, используются при разработке моделей вместимости, как правило косвенно, зачастую повторяя редукции, уже выполненные в массовых моделях. На первый план выходят вопросы моделирования внутреннего пространства корабля, геометрически

характеристик размещенных в нем объектов и крупных конструктивных узлов. Вследствие этого основным путем нарастающей сложности вместимостных моделей является более широкое применение многочленных зависимостей. Так, для определения объема, потребного для размещения экипажа корабля, используется формула

$$V_{\text{экипаж}} = n(\gamma_1 A_{\text{р}} + \gamma_2 A_{\text{о}} + \gamma_3 A_{\text{с}}), \quad (7.23)$$

где  $A_{\text{р}}$ ,  $A_{\text{о}}$ ,  $A_{\text{с}}$  — количество рядовых, старшинского состава сверхрочной службы и офицеров на корабле соответственно;  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ ,  $\gamma_3$  — площади, необходимые для размещения одного члена экипажа соответствующей категории по требованиям ВМФ;  $b$  — межпалубное расстояние на корабле;  $V_{\text{экипаж}}$  — потребный объем, входящий в член  $V_{\text{с}}$  уравнения (7.21).

Растрачиваемость во вместимостных моделях выражений типа (7.23) объясняется также низкой степенью разработанности этого направления. Поэтому нередко крупные и сильно влияющие на боевую эффективность корабля объекты размещения описываются во вместимостных моделях многомерными регрессиями, а также факторным анализом и достаточно адекватные модели, как, например, модель определения потребного объема пироба ракетного боекомплекта зенитно-ракетного комплекса, встречаются еще достаточно редко.

Левая часть уравнения вместимости (7.19) обозначает объем, фактически предоставляемый внутренним пространством корпуса и надстроек корабля, или, просто фактический объем корабля. Проблема определения фактического объема принципиально делится на вычисление объема корпуса и объема надстроек. Объем корпуса составляет большую часть (до 75%) общей фактической вместимости корабля и может быть достаточно точно определен. Объем же надстроек существенно зависит от архитектурно-компоновочных решений, принимаемых при формировании внешнего облика корабля. Поэтому на уровне совместного решения уравнений масс и вместимости объем надстройки сколько-нибудь точно определен быть не может. Обычно для учета надстройки используют способ проецирования. Даль-

нейшее же уточнение осуществляется на основе графически проработок.

Объем корпуса корабля по верхней палубе зависит от главных размеров и коэффициентов теоретического чертежа. Окончательно теоретический чертеж проектируемого корабля формируется уже на стадии эскизного проектирования после проведения исследований по физическому моделированию в бассейне. На ранних же стадиях проектирования, когда определяются главные размеры корабля, его теоретический чертеж обычно считается частично подобным теоретическому чертежу прототипа с сохранением значений основных коэффициентов. При этом возможно аналитическое представление обводов корпуса корабля с помощью сплайн-функций (сплайн-аппроксимация) или на основе так называемого "параболического корпуса". Применение сплайн-аппроксимации ведет к значительной алгоритмизации и усложнению ("утяжелению") модели. Получаемое при этом по сравнению с "параболическим корпусом" уточнение обычно не превышает точности моделирования на этапе совместного решения уравнений масс и вместимости, о которых здесь идет речь. Этот метод моделирования судовой поверхности используется позже для визуализации ее внешнего вида или для некоторых специальных задач трансформации теоретического чертежа.

Моделирование поверхности корпуса корабля на основе "параболического корпуса" выполняется в предположении о том, что любая главная кривая теоретического чертежа: ватерлиния, плангоут или батокс, может быть представлена в виде параболы  $n$ -й степени. Наиболее известным способом определения фактического объема корпуса таким путем является приближенный способ В. Л. Пездонина [286]. Суть его заключается в следующем.

Если стреловую по ватерлинии представить параболой  $n$ -й степени с вершиной при основной плоскости, то выражение для нее примет вид:

$$S_z = S \left( \frac{z}{T} \right)^{2n} \quad (7.24)$$

где  $S$  — площадь конструктивной ватерлинии (КВЛ);  $T$  — осадка по КВЛ;  $z$  — текущая осадка корабля;  $S_z$  — площадь ватерлинии, проходящей на уровне текущей осадки  $z$ .

Используя (7.24), можно определить фактический объем корпуса корабля по произвольную ватерлинию

$$V_z = S \int_0^z \left( \frac{z}{T} \right)^{2n} dz = ST \int_0^z \left( \frac{z}{T} \right)^{2n} d \left( \frac{z}{T} \right) = ST \frac{n}{n+1} \left( \frac{z}{T} \right)^{2n+1} \quad (7.25)$$

С другой стороны, объемное водонизмещение корабля определяется по формуле

$$V = \delta LBT = ST\psi, \quad (7.26)$$

где  $\psi$  — коэффициент вертикальной полноты корпуса по КВЛ;  $\psi = \delta/\alpha$ ;  $\alpha$  — коэффициент полноты КВЛ.

Приравняв правую часть (7.25), вычисленную для значения  $z = T$ , и правую часть выражения (7.26), получим выражение для определения показателя степени параболы

$$\frac{n}{n+1} = \psi \Rightarrow n = \frac{\psi}{1-\psi} \quad (7.27)$$

Считая, что коэффициент вертикальной полноты корпуса, вычисленный по КВЛ, остается неизменным и для корпуса по верхней палубе, запишем выражение для определения объема корпуса по верхней палубе в виде

$$V_{\text{вп}} = ST\psi \left( \frac{H}{T} \right)^{2n} = V \left( \frac{H}{T} \right)^{2n} \quad (7.28)$$

Для исключения дробного показателя степени в (7.28) и удобства последующего сравнительного анализа разложим  $\left( \frac{H}{T} \right)^{2n}$  в ряд по степеням  $(H/T - 1)$  и сохраним три первых члена ряда:

$$\left( \frac{H}{T} \right)^{2n} = 1 + \frac{1}{\psi} \left( \frac{H}{T} - 1 \right) + \frac{1}{2\psi} \left( \frac{1}{\psi} - 1 \right) \left( \frac{H}{T} - 1 \right)^2 \quad (7.29)$$

Тогда (7.28) примет вид

$$V_{\text{вн}} = V \left[ 1 + \frac{1}{\psi} \left( \frac{H}{T} - 1 \right) + \frac{1}{2\psi} \left( \frac{H}{T} - 1 \right)^2 \right] \quad (7.30)$$

С целью анализа и оценки ошибки, которую мы получаем, пользуясь формулой (7.30), рассмотрим еще один подход к определению объема корпуса проектируемого корабля /286/. В соответствии с этим подходом объем корпуса корабля по верхнюю палубу представляется в виде составивших

$$V_{\text{вн}} = V_0 + V_1, \quad (7.31)$$

где  $V_0$  — объем погруженной части корпуса корабля;  $V_1$  — объем надводной части корпуса.

Объем надводной части корабля определяется выражением

$$V_1 = \delta L B T, \quad (7.32)$$

а объем его надводной части может быть приближенно вычислен в предположении о прямолинейности надводного борта:

$$V_1 = L B \alpha (H - T). \quad (7.33)$$

Используя (7.31), (7.32) и (7.33), получим

$$V_{\text{вн}} = \delta L B T + L B \alpha (H - T) \quad (7.34)$$

или, после приведения к виду, сравнимому с выражением (7.30),

$$V_{\text{вн}} = V \left[ 1 + \frac{1}{\psi} \left( \frac{H}{T} - 1 \right) \right]. \quad (7.35)$$

Сравнивая (7.30) и (7.35) можно заметить, что (7.35) образуется из (7.30) путем отбрасывания последнего члена ряда. При этом, вычисления по формуле (7.30) дают несколько завышенные результаты за счет того, что развал бортов корабля выше КВЛ обычно уменьшается (во всяком случае для кораблей обычной архитектуры), чего не учитывает предположение, благодаря которому нам удалось получить выражение (7.28). Вычисления же, осуществляемые по формуле (7.35), дают значительно заниженные оценки, так как в основу этого выражения положена

гипотеза о прямолинейности корпуса. Нередко значение объема корпуса корабля определяют как среднее между значениями, полученными по формулам (7.30) и (7.35), что эквивалентно сокращению лишь половины третьего члена разложения в (7.35).

#### Пример. Определение главных элементов корабля на основе совместного решения уравнения масс и вместимости

##### Исходные данные задачи

Аналогично примеру, рассмотренному в предыдущем параграфе, используются следующие данные прототипа:  $L^0$  — длина;  $B^0$  — ширина;  $T^0$  — осадка;  $H^0$  — высота борта;  $D^0$  — водоизмещение;  $P_{\text{вн}}^0$  — масса корпуса;  $P_{\text{об}}^0$  — масса снабжения;  $P_{\text{з}}^0$  — масса запаса водоизмещения;  $P_{\text{э}}^0$  — масса электрооборудования;  $P_{\text{с}}^0$  — масса систем;  $P_{\text{г}}^0$  — масса жидких грузов;  $P_{\text{м}}^0$  — масса механической установки;  $P_{\text{т}}^0$  — масса топлива;  $P_{\text{зп}}^0$  — масса заплаты;  $v_{\text{п}}^0$  — скорость полного хода;  $WPS_{\text{п}}^0$  — полная мощность ГЭУ;  $v_{\text{э}}^0$  — скорость экономического хода;  $WPS_{\text{э}}^0$  — мощность ГЭУ экономического хода.

ТТХ проектируемого корабля:  $v_{\text{п}}$  — скорость полного хода;  $v_{\text{э}}$  — скорость экономического хода;  $P_{\text{конт}}^0$  — масса контура ПЛО;  $q_{\text{пло}}$  — плотность контура ПЛО;  $P_{\text{пво}}$  — масса контура ПВО;  $q_{\text{пво}}$  — плотность контура ПВО;  $P_{\text{уво}}$  — масса контура УРО;  $q_{\text{уво}}$  — плотность контура УРО;  $P_{\text{нв}}^0$  — масса неварьированного вооружения;  $q_{\text{нв}}$  — плотность неварьированного вооружения;  $q_{\text{тс}}$  — удельный расход топлива;  $R$  — дальность плавания;  $i_{\text{мин}}$  — мин отношение  $\frac{H}{T}$ ;  $i_{\text{макс}}$  — макс отношение  $\frac{H}{T}$ ;  $\alpha$  — коэффициент полноты ватерлинии;  $\delta$  — коэффициент полноты корпуса;  $K_{\text{рз}}$  — коэффициент учета развала бортов;  $K_{\text{об}}$  — коэффициент учета объема надстройки;  $V_{\text{над}}$  — объем надстройки;  $\epsilon$  — норма точности расчета по объему корпуса;  $t_{\text{ср}}$  — среднее

значение отношения высоты борта к осадке;  $v_p$  — норма точности по водоизмещению.

Определение отношения высоты борта к осадке

$$l_{op} = \frac{l_{max} + l_{min}}{2}$$

Расчет массовой модели корабля

Определение полезной нагрузки

$$P_{по} = P_{пав} + P_{пво} + P_{уво} + P_{комм}$$

Определение водоизмещения в 1-м приближении

$$D = 4P_{по}$$

Вычисление главных размерений

$$\lambda = L^0/B^0; \quad \tau = B^0/T^0;$$

$$L = \sqrt{\frac{D\lambda^2\tau}{b\gamma}}; \quad B = LD; \quad T = B\tau.$$

$H = l_{op}T$  — приведенная высота борта;

$$\rho_{в1}^1 = \rho_{в0}^0 \lambda^2 B^0 H^0;$$

Вычисление массы корпуса

$$P_{к1} = \rho_{в1}^1 LBH.$$

Вычисление массы оборудования

$$\rho_{в2}^2 = \rho_{в0}^0/D^0; \quad P_{в2} = \rho_{в2}^2 D.$$

Вычисление массы запаса водоизмещения

$$\rho_{в3}^3 = \rho_{в0}^0/D^0; \quad P_{в3} = \rho_{в3}^3 D.$$

Вычисление массы электрооборудования

$$\rho_{в4}^4 = \rho_{в0}^0/D^0; \quad P_{в4} = \rho_{в4}^4 D.$$

Вычисление массы систем

$$\rho_{в5}^5 = \rho_{в0}^0/D^0; \quad P_{в5} = \rho_{в5}^5 D.$$

Вычисление массы жидких грузов

$$\rho_{в6}^6 = \rho_{в0}^0/D^0; \quad P_{в6} = \rho_{в6}^6 D.$$

Вычисление адмиралтейского коэффициента полного хода

$$C_{пол} = (D^0)^{0,33} (v_{пол}^0)^2 / WPS_{пол}^0.$$

Вычисление полезной мощности ГЭУ

$$WPS_{пол} = D^{0,33} v_{пол}^0 / C_{пол}$$

Вычисление массы ГЭУ

$$\rho_{в7}^7 = \rho_{в0}^0 / WPS_{пол}^0; \quad P_{в7} = \rho_{в7}^7 WPS_{пол}$$

Вычисление адмиралтейского коэффициента экономического хода

$$C_{эко} = (D^0)^{0,33} (v_{эко}^0)^2 / WPS_{эко}^0.$$

Вычисление мощности ГЭУ экономического хода

$$WPS_{эко} = D^{0,33} v_{эко}^0 / C_{эко}$$

Вычисление массы топлива

$$P_{т1} = \frac{1}{2} q_{т1} WPS_{эко} \frac{R}{v_{эко} \cdot 1000};$$

$$q = 0,569 \text{ кг/л.с.ч.}$$

Вычисление массы защиты

$$\rho_{в8}^8 = \rho_{в0}^0/D^0; \quad P_{в8} = \rho_{в8}^8 D.$$

Вычисление водоизмещения корабля

$$D_1 = P_{к1} + P_{в2} + P_{в3} + P_{в4} + P_{в7} + P_{в5} + P_{в6} + P_{т1} + P_{в8} + P_{в1}$$

$$D_1 = D_1 - D.$$

Если  $D_1 \leq \epsilon$ , то  $D = D_1$ . Если  $D_1 > \epsilon$ , то возврат на вычисление массы корпуса.

Расчет объемной модели корабля

$$V = (1 + \alpha\beta)(V_{пр} - \Gamma)(1 + K_{ра})$$

Если  $V_{пр}^* > 0$ , то  $V_{зад} = V_{пр}^*$ .

Если  $V_{пр}^* < 0$ , то  $V_{зад} = DP K_{зад}$ .

$$V_{ф} = DP + V_{зад}.$$

Вычисление объема полезной нагрузки

$$V_{на} = P_{павогруз} + P_{павофто} + P_{павогото} + P_{нафотоп}$$

Вычисление объема корпуса

$$\gamma_{к} = 7,8 \text{ т/м}^3; \quad V_{к} = P_{к}/\gamma_{к}.$$

Вычисление объема ГЭУ

$$q_{гэ} = 0,063; \quad V_{гэ} = q_{гэ} W P S_{гэ}.$$

Вычисление объема штеера

$$q_{ш} = 0,303; \quad V_{ш} = q_{ш} D.$$

Вычисление объема ЭЭС

$$q_{эс} = 0,064; \quad V_{эс} = q_{эс} V_{ф}.$$

Вычисление объема запаса водонемешения

$$q_{за} = 0,03; \quad V_{за} = q_{за} V_{ф}.$$

Вычисление объема жилых помещений

$$q_{жл} = 0,325; \quad V_{жл} = q_{жл} D.$$

Вычисление объема кладовых БЧ и служб

$$q_{кл} = 0,09; \quad V_{кл} = q_{кл} D.$$

Вычисление объема систем, устройств, вентиляции

$$q_{ст} = 0,09; \quad V_{ст} = q_{ст} D.$$

Вычисление объема защиты

$$\gamma_{з} = 7,8 \text{ т/м}^3; \quad V_{з} = P_{з}/\gamma_{з}.$$

Вычисление неэффективно используемого объема

$$q_{не} = 0,07; \quad V_{не} = q_{не} V_{ф}.$$

Вычисление потребного объема

$$V_{пот} = V_{на} + V_{к} + V_{гэ} + V_{ш} + V_{эс} + V_{за} + V_{жл} + V_{кл} + V_{ст} + V_{з} + V_{не}.$$

$$V_1 = V_{пот} - V_{ф}.$$

Если  $V_1 \leq \epsilon$ ;  $k_{пр} > k_{зад}$ , но  $\leq k_{зад}$ , то конец вычислений.

Если  $V_1 > \epsilon$ ;  $k_{пр} \leq k_{зад}$ , то  $k_{пр} = k_{зад}$ .

Если  $k_{пр} > k_{зад}$ , то  $k_{пр} = k_{зад}$ .

Если  $k_{пр} > k_{зад}$ , но  $\leq k_{зад}$ , то возврат к вычислению отношения высоты борта к осадке.

### 7.3. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИРАЩЕНИЯ ВОДОНЕМЕЩЕНИЯ ПРОЕКТИРУЕМОГО КОРАБЛЯ

При удачно выбранном прототипе или тогда, когда необходимо получить самый грубый прогноз водонемешения проектируемого корабля, часто используются дифференциальные коэффициенты приращения водонемешения. В основе подхода к определению этих коэффициентов лежат методы, разработанные Ж. Норманом и И. Г. Бубновым и дополненные А. И. Балашовым. Сущность их заключается в составлении и решении дифференциальных уравнений, связывающих между собой приращения главных элементов проектируемого корабля.

Дифференциальные коэффициенты приращения водонемешения вычисляются применительно к некоторому заранее выбранному прототипу. При этом считается, что водонемешение проектируемого корабля может быть получено путем учета изменения весовой нагрузки прототипа по отношению к проекту. Пусть в результате изменений, внесенных в прототип для получения характеристик проекта, нагрузка прототипа получит некоторое положительное или отрицательное приращение  $\Delta P$ . В связи с этим измененная масса прототипа  $P_0 + \Delta P$  не будет равна его водонемешению, что приведет к необходимости соответствующего изменения главных размеров, с тем чтобы масса и водонемешение измененного прототипа были равны.

Изменения же главных размеров прототипа приведут к дальнейшему изменению масс по статьям нагрузки, зависящим от главных размеров. Без изменения в этом случае останутся массы вооружения, боезапаса и другие статьи нагрузки, не зависящие от главных размеров.

Если сумму масс, полученную в результате изменения главных размеров прототипа, обозначить  $dP$ , то измененная масса прототипа окончательно может быть определена в виде

$$P_1 = \Delta P + dP.$$

Соответственно измененной массе прототипа изменится и его водоизмещение на величину  $dD$ . Таким образом, окончательно будет иметь место следующая зависимость:

$$D_1 + dD = P_1 + \Delta P + dP$$

или

$$dD = \Delta P + dP. \quad (7.36)$$

Зависимость (7.36) показывает, что вызванное изменением главных размеров корабля приращение водоизмещения  $dD$  на величину  $\Delta P$  больше приращения массы корабля  $dP$ , вызванного теми же изменениями главных размеров. Это свидетельствует о том, что если требуется изменить какую-либо статью или раздел нагрузки корабля на величину  $\Delta P$  (при сохранении неизменными прочих тактико-технических элементов), необходимо изменить водоизмещение корабля на величину  $dD = \Delta P + dP$  и, наоборот, при каком-либо заданном изменении водоизмещения проектируемого корабля будет иметь место возможность менять по своему усмотрению некоторые статьи нагрузки на общую величину массы  $\Delta P$ .

Зависимость (7.36) может быть представлена в виде

$$\Delta P = dD(1 - dP/dD)$$

или

$$dD = \frac{1}{1 - dP/dD} \Delta P = \kappa \Delta P, \quad (7.37)$$

$$\kappa = \frac{1}{1 - dP/dD} \quad (7.38)$$

называется обобщенным коэффициентом приращения водоизмещения. Этот коэффициент показывает, на сколько тонн изменится водоизмещение корабля при изменении его нагрузки на 1 т. Следует иметь в виду, что отношение  $dP/dD$  надо рассматривать как отношение полных дифференциалов, а не как производную  $P$  по  $D$ .

Коэффициент приращения водоизмещения зависит от типа корабля, характера его нагрузки и распределения масс по ее статьям. Если  $\kappa = 5$ , то это значит, что при изменении массы какого-либо раздела нагрузки проектируемого корабля против прототипа на  $\Delta P = 30$  т его водоизмещение изменится на  $dD = 5 \cdot 30 = 150$  т.

Для практического использования обобщенного коэффициента необходимо исключить неизвестные приращения типа  $dL$ ,  $dB$ ,  $dT$ ,  $dB$  или воспользоваться дополнительными уравнениями, связывающими неизвестные приращения.

Рассмотрим наиболее важные частные случаи возможного практического использования дифференциального коэффициента приращения.

1. Заданное приращение независимых масс  $\Delta P$  компенсируется за счет изменения какого-либо одного элемента корабля, например, длины ( $L$ ). Тогда  $dB = dT = dB = 0$ , а  $dP/dD$  примет вид

$$dP/dD = \frac{dL \partial P / \partial L + dB \partial P / \partial B + dT \partial P / \partial T + dB \partial P / \partial B}{D(dL/L + dB/B + dT/T + dB/B)}$$

или

$$dP/dD = (\partial P / \partial L)(L/D). \quad (7.39)$$

Подставив полученное в (7.38), получим

$$\kappa = \frac{1}{1 - (\partial P / \partial L)(L/D)}. \quad (7.40)$$

Аналогично для других элементов корабля можно установить, что

$$\begin{aligned} n_1 &= \frac{1}{1 - (\partial P / \partial B)(B / D)}; \\ n_2 &= \frac{1}{1 - (\partial P / \partial T)(T / D)}; \\ n_3 &= \frac{1}{1 - (\partial P / \partial \delta)(\delta / D)}. \end{aligned} \quad (7.41)$$

Полученные коэффициенты могут быть названы частными коэффициентами приращения водоизмещения по длине, ширине, осадке и по коэффициенту общей полноты корпуса корабля. Эти коэффициенты позволяют определить, насколько изменится водоизмещение корабля в связи с изменением независимых масс, различных показателей и удельных характеристик в предположении, что изменение масс будет компенсировано за счет изменения длины или ширины, осадки или коэффициента общей полноты.

Приращение водоизмещения в этом случае согласно (7.39), (7.40) и (7.41) может быть определено по одной из следующих формул:

$$\begin{aligned} dD_1 &= n_1 \Delta P; \\ dD_2 &= n_2 \Delta P; \\ dD_3 &= n_3 \Delta P; \\ dD_4 &= n_4 \Delta P. \end{aligned} \quad (7.42)$$

Эти частные коэффициенты приращения водоизмещения могут быть определены для любого корабля, если известны его элементы и нагрузка масс.

2. При переходе от прототипа к проекту необходимо пропорционально изменить главные размеры и сохранить коэффициент общей полноты, т. е. выполнить условия:

$$\begin{aligned} dL/L &= dB/B = dT/T = a; \\ d\delta &= 0. \end{aligned} \quad (7.43)$$

Преобразуя (7.36)—(7.39) к виду

$$\begin{aligned} \partial P / \partial L &= (1 - 1/n_4) D / L; \\ \partial P / \partial B &= (1 - 1/n_2) D / B; \\ \partial P / \partial T &= (1 - 1/n_3) D / T \end{aligned} \quad (7.44)$$

и подставляя (7.43) в выражение обобщенного коэффициента приращения водоизмещения

$$n = \frac{1}{1 - \frac{dL \partial P / \partial L + dB \partial P / \partial B + dT \partial P / \partial T + d\delta \partial P / \partial \delta}{D \delta (dL/L + dB/B + dT/T + d\delta/\delta)}}$$

после соответствующего преобразования можно получить

$$n = \frac{1}{1/3(1/n_1 + 1/n_2 + 1/n_3)}. \quad (7.45)$$

Если же при переходе от прототипа к проекту принято решение пропорционально изменить главные размеры корабля и коэффициент общей полноты, то в результате преобразований, аналогичных предыдущим, можно получить зависимость для обобщенного коэффициента приращения водоизмещения в виде

$$n = \frac{1}{1/4(1/n_1 + 1/n_2 + 1/n_3 + 1/n_4)}. \quad (7.46)$$

3. Рассмотрим случай, при котором все массы, составляющие нагрузку корабля, выражены не через главные размеры, а через водоизмещение корабля. При этом будем считать, что эта зависимость степенная, а именно:

$$P = \sum q_i D^m + Q, \quad (7.47)$$

где  $q_i$  — коэффициент пропорциональности для статей нагрузки, а  $Q$  — независимые от водоизмещения массы.

Полная производная от суммарной массы корабля по водоизмещению может быть представлена выражением

$$\Delta P = dD \Delta P / \Delta D.$$

Используя это выражение, обобщенный коэффициент приращения водоизмещения  $\alpha_D$  можно представить в виде, впервые предложенном Ж. Норманом:

$$\alpha_D = \frac{1}{1 - \Delta P / \Delta D}. \quad (7.48)$$

Приращение водоизмещения в этом случае будет равно

$$\Delta D = \alpha_D \Delta P. \quad (7.49)$$

Следует отметить, что если массы нагрузки корабля выражены в степенной зависимости от водоизмещения, то с математической точки зрения, не вдаваясь в физический смысл явлений, безразлично, за счет какого из элементов корабля происходит увеличение водоизмещения. Этот вывод основан на том, что при принятых условиях коэффициенты приращения водоизмещения по главным размерениям равны друг другу и равны коэффициенту Ж. Нормана  $\alpha_D$ .

Действительно, если массы нагрузки корабля выражены через водоизмещение в виде степенных зависимостей, т. е.

$$P = \sum_i P_i = \sum_i q_i D^m + Q = \sum_i q_i (\gamma \Delta L B T)^m + Q,$$

то, например,

$$\Delta P / \Delta L = \sum_i m_i P_i / L.$$

Тогда, согласно (7.40)

$$\alpha_L = \frac{1}{1 - (\Delta P / \Delta L)(L/D)} = \frac{1}{1 - \sum m_i P_i / D} = \frac{1}{1 - \Delta P / \Delta D} = \alpha_D$$

и аналогично вышесказанному можно показать, что

$$\alpha_L = \alpha_B = \alpha_T = \alpha_H = \alpha_D.$$

Величина  $\alpha_D$  называется коэффициентом Нормана, или частным коэффициентом приращения водоизмещения по водоизмещению, соответствующим уравнению масс, выраженному через

водоизмещение. Коэффициент Нормана для однотипных кораблей и судов колеблется в относительно узком пределах, зависящих от соотношения разделов нагрузки масс корабля.

Для военных кораблей коэффициент Нормана колеблется от 2 до 5, т. е. при изменении независимых масс прототипа на величину  $\Delta P$  ( $\tau$ ) водоизмещение его изменится на величину  $(2-5)\Delta P$  ( $\tau$ ). Л. М. Ногин в работе [254] приводит величины коэффициента Нормана, вычисленные по формуле (7.48) для различных классов кораблей и судов:

- грузовые суда 1.5—1.7;
- пассажирские суда 1.8—2.2;
- крейсера 3.0—3.5;
- эскадренные миноносцы 3.5—4.0.

Стабильность коэффициента Нормана позволяет использовать его для приближенных расчетов водоизмещения прототипа при различных вариантах изменения независимых масс, рассматриваемых при разработке проекта корабля.

Рассмотрим общий случай применения коэффициента Нормана для уравнения вида

$$P = \sum_i P_i = q_1 D + q_{m1} \frac{D^{m_1} v_{m1}^1}{C_{v_{m1}^1}} + q_{m2} \frac{D^{m_2} v_{m2}^2}{C_{v_{m2}^2}} + P_{m3}. \quad (7.50)$$

где  $q_i$  — общий коэффициент пропорциональности для статей укрупненной нагрузки масс, зависящих от водоизмещения в первой степени;

- $q_1 = q_0 + q_{m1} + q_{m2} + q_{m3} + q_{m4} + q_{m5}$ ;
- $P_{m3}$  — независимые от водоизмещения массы.

В общем виде приращение водоизмещения

$$\Delta D = (dP_1 + dP_2) \alpha_D,$$

где  $dP_1$  — приращение масс, зависящих от водоизмещения,

$$\begin{aligned} dP_1 &= (dP_1 + dP_{m1} + dP_{m2})_0 = dDP_1/D + dD(2/3 P_{m1})/D + dD(2/3 P_{m2})/D = \\ &= [P_1 + 2/3(P_{m1} + P_{m2})] dD/D; \end{aligned}$$

$dP_2$  — приращение масс, связанные с изменением других элементов и характеристик корабля,



8.1. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛАВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПЕРВОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

Большинство существующих методов определения главных элементов корабля основывается на решении уравнения масс, во многом с этим связана наибольшая степень разработанности этих методов. И тогда становится понятно, почему в первом приближении используется только это уравнение. При этом уровень сложности задачи первого приближения определяется степенью сложности фрагментов массовой модели корабля, составляющих левую часть выражения

$$\sum m_i = D = \gamma \Delta B T, \quad i \in \Omega. \quad (8.1)$$

С точки зрения методов решения этого уравнения принципиальным является установление соответствия между сложностью математической модели и уровнем используемого для решения задачи метода. Так, в случае формирования фрагментов массовой модели методом проинтегрирования или на основе любого другого линейного преобразования, уравнение масс может быть непосредственно разрешено относительно массового водонамещения. Если же модельные зависимости отвечают виду полинома с достаточно небольшим значением показателя степени, то тогда уравнение масс также может быть решено алгебраическими средствами. Так обстоит дело с известным в проектировании "кубическим" уравнением, имеющим порядок не выше третьего и разрешаемого, например, с помощью формул Кардана [286].

И тот и другой случай характерны тем, что уравнение масс может быть преобразовано в виду, явно разрешимому относительно водонамещения. В терминах более общей задачи такая схема получила название "прямого" синтеза. Все другие случаи для решения уравнения (8.1) требуют организации специальной итерационной процедуры, составляющей основу обратной задачи проектирования.

$$dP_0 = (dP) + dP_{m0} + dP_{R0} = P_{m0} dP_1/P_1 + P_{m0} (dq_{m0}/q_{m0} + 3dv_{m0}/v_{m0} - dC_{m0}/C_{m0}) + P_{R0} (dq_{R0}/q_{R0} + dR/R + 2dv_{R0}/v_{R0} - dC_{R0}/C_{R0});$$

$k_{D0}$  — коэффициент Нормана в форме (7.48).

Постоянное изменение перемещений масс, связанное с изменением всех элементов, входящих в уравнение (7.50), может быть представлено в виде

$$dP_1 = P_1(dP_1/P_1) + dD/D;$$

$$dP_{m0} = P_{m0}(dq_{m0}/q_{m0} + 3dv_{m0}/v_{m0} - dC_{m0}/C_{m0} + 2\beta dEND);$$

$$dP_{R0} = P_{R0}(dq_{R0}/q_{R0} + dR/R + 2dv_{R0}/v_{R0} - dC_{R0}/C_{R0} + 2\beta dD/D).$$

Необходимо отметить, что если для перехода от прототипа к проекту требуется значительное приращение независимых переменных, то точность расматриваемых дифференциальных уравнений может оказаться недостаточной. В этом случае после определения новой нагрузки и определения погрешности  $\Delta P = P - P_0$  можно рекомендовать определение элементов корабля во втором приближении, приняв полученную погрешность за заданное приращение независимых масс. Эти преобразования приводятся в [286].

Если развернуть зависимость (7.36), то можно получить дифференциальное уравнение масс, решение которого позволит определить искомые изменения главных размеров прототипа. На этом подходе основан ряд так называемых дифференциальных методов определения главных элементов корабля. В разработке этих методов принимали участие также известные специалисты в области теории проектирования, как А. И. Балашов, В. В. Ашак, В. А. Никитин и другие. Актуализация дифференциальных методов относится ко времени, предшествующему широкому внедрению в проектные исследования электронно-вычислительной техники. В современных условиях их практическое значение невелико. Вместе с тем, использование аппарата дифференциального исчисления при определении главных элементов корабля играет и сегодня важную методическую роль в понимании сущности обратной задачи проектирования.

Необходимость применения итерационных методов для решения уравнения масс далеко не всегда определяется сложностью или трансцендентностью (алгебраической неразрешимостью) модельных функций. Гораздо чаще аналитическое решение становится невозможным из-за алгоритмизации модели. Однако наиболее существенным аргументом все же является специфика вычислительного процесса, возникающая при разработке систем автоматизированного проектирования. Она находит выражение в одном из основных требований, предъявляемых к системам этого типа — это требование модульного построения программного наполнения модели. Необходимость его выполнения объясняется стремлением разработчиков обеспечить возможность изменения того или иного фрагмента модели, не затрагивая структуры всей задачи, и привлечения к этой работе людей, не связанных непосредственно с разработкой самой системы. С вычислительной точки зрения это требование может быть реализовано только в том случае, если организация процесса решения уравнения никак не будет зависеть от вида входящих в него модельных функций. Именно такой подход и реализуется в наиболее распространенном сегодня итерационном методе, основанном на применении принципа сжатых отображений. В системах автоматизированного проектирования этот метод впервые был применен в ЦНИИ МО РФ.

Принцип сжатых отображений формулируется для отображений абстрактных множеств, называемых полными метрическими пространствами. Частным случаем этих пространств является отрезок числовой прямой, и поэтому принцип сжатых отображений может быть применен для решения числовых уравнений.

Для того, чтобы можно было воспользоваться принципом сжатых отображений, необходимо привести решаемое уравнение к виду

$$x = F(x), \quad (8.2)$$

где  $x$  — искомое значение аргумента, в нашем случае — водоизмещение корабля, а  $F(x)$  — модифицированная функция математической модели.

Нетрудно видеть, что уравнение масс (8.1) всегда может быть записано в виде (8.2). Причем, это свойство характерно не только для уравнения масс. Из более общей задачи системного анализа известно, что в моделируемой системе всегда присутствуют так называемые переменные "замыкания", обеспечивающие ее замкнутость. Так, если моделируется такое инженерное сооружение, как корабль, то в качестве замыкающих переменных здесь выступают величины, характеризующие как каждую из подсистем корабля, так и весь корабль в целом. При этом общая характеристика корабля образуется как сумма значений соответствующих характеристик его подсистем. Это последнее обстоятельство и позволяет говорить о замкнутости системы по такой переменной. В рассматриваемом здесь случае в качестве переменной замыкания выступает масса, именно поэтому применительно к уравнению масс выражение (8.2) может быть легко реализовано. В следующем параграфе будет рассмотрено замыкание по объемам (площадям). Возможны и более сложные случаи.

Рассмотрим, какие требования необходимо наложить на функцию  $F(x)$ , чтобы решение (8.2) существовало и было единственным. При решении уравнения (8.2) итерационным путем каждое значение приобретает универсальные вычислительные алгоритмы. Одним из наиболее употребительных алгоритмов является метод последовательных приближений. Суть его заключается в следующем.

Задается произвольное число  $x_1$  из отрезка  $[a, b]$ , на котором ищется корень. Число  $x_1$  называется первым приближением. Далее в качестве второго приближения  $x_2$  берется число

$$x_2 = F(x_1).$$

Затем в качестве следующего приближения берут число

$$x_3 = F(x_2).$$

И вообще, если найдены приближения  $x_1, x_2, \dots, x_{n-1}$ , то в качестве  $n$ -го приближения берут число

$$x_n = F(x_{n-1}), \quad n \in \{1, \dots, \infty\}. \quad (8.3)$$

Полученные числа  $x_1, x_2, \dots$  называют последовательными приближениями корня уравнения (8.2).

Предположим, что с увеличением номера  $n$  числа  $x_n$  приближаются к некоторому числу  $C$  из отрезка  $[a, b]$ :

$$x_n \rightarrow C,$$

т. е.  $C$  — корень уравнения (8.2).

Математическое обоснование метода последовательных приближений заключается в доказательстве того, что:

а) для любого номера  $n$  можно построить  $n$ -е приближение  $x_n$ ;

б) последовательные приближения  $x_n$  стремятся к некоторому числу  $C$ ;

в) значения  $F(x_n)$  стремятся к значению  $F(C)$ .

Если эти три условия выполняются, то из равенства (8.2) следует, что  $C$  — корень уравнения (8.2). Условие а) может оказаться невыполнимым, если для некоторого номера  $n$  число  $F(x_{n-1})$  выйдет за пределы отрезка  $[a, b]$ . Тогда для числа  $x_n = F(x_{n-1})$  нельзя вычислить  $F(x_n)$ , так как функция  $F$ , вообще говоря, не определена вне отрезка  $[a, b]$ . Следовательно, нельзя построить  $(n+1)$ -е приближение. Для выполнения условия а) потребуем, чтобы на всем отрезке  $[a, b]$  выполнялось двойное неравенство

$$a \leq F(x) \leq b \quad \text{при } x \in [a, b]. \quad (8.4)$$

Это неравенство означает, что каково бы ни было число  $x \in [a, b]$ , число  $F(x)$  лежит на отрезке  $[a, b]$ . Иначе говоря, функция  $F$  переводит отрезок  $[a, b]$  в себя.

Для выполнения условия б) потребуем, чтобы функция  $F$  была непрерывной в каждой точке отрезка  $[a, b]$ . (Напомним, что функция  $F$  называется непрерывной в каждой точке  $x \in [a, b]$ , если для любой последовательности чисел  $x_n \in [a, b]$  из  $x_n \rightarrow x$  следует  $F(x_n) \rightarrow F(x)$ ).

Таким образом, если мы хотим получить решение уравнения (8.2) методом последовательных приближений, необходимо потребовать, чтобы функция  $F$  была непрерывной и удовлетворяла неравенству (8.4).

Рассмотрим условие б). К сожалению, нет критерия, который позволил бы для каждой функции  $F$  дать однозначный ответ на вопрос об удовлетворении ее условию б). Однако имеются некоторые достаточные условия. Одно из таких условий получило название условия Липшица по имени немецкого математика Р. Липшица (1832—1903).

Говорят, что функция  $F$ , определенная на отрезке  $[a, b]$ , удовлетворяет условию Липшица с константой  $\alpha$ , если для всех  $x, y$  из отрезка  $[a, b]$  выполняется неравенство

$$|F(x) - F(y)| \leq \alpha |x - y| \quad x, y \in [a, b]. \quad (8.5)$$

Здесь следует заметить, что каждая функция, удовлетворяющая условию Липшица, непрерывна на отрезке  $[a, b]$ .

Особое значение имеет условие Липшица (8.5) в случае, когда постоянная  $\alpha \leq 1$ . Это и есть то неравенство, которое обеспечивает выполнение условия в).

Если отображение  $F$  удовлетворяет условию Липшица с константой  $\alpha \leq 1$ , то расстояние между образами двух любых точек из отрезка  $[a, b]$  (точка  $F$  называется образом точки  $x$ , если выполняется равенство  $F = F(x)$ ) меньше расстояния между этими точками по крайней мере в  $1/\alpha$  раз. Отображение  $F$  как бы сжимает отрезок  $[a, b]$ , поэтому его называют сжатым.

Итак, функция  $F$ , определенная на отрезке  $[a, b]$ , есть сжатое отображение отрезка  $[a, b]$ , если выполняется неравенство (8.5) с некоторой положительной  $\alpha \leq 1$ .

При этом существует доказательство следующего утверждения /394/.

Пусть функция  $F$  есть сжатое отображение отрезка  $[a, b]$  в себя. Тогда независимо от выбора первого приближения  $x_0 \in [a, b]$  последовательность  $x_n$ , определяемая формулой

$$x_n = F(x_{n-1}), \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

сходится к корню уравнения

$$x = F(x),$$

причем этот корень единственный.



Рис. 8.1

Блок-схема алгоритма, реализующего решение уравнения (8.2) на основе принципа сжатых отображений, показана на рис.8.1. При этом корень уравнения отвечает точке пересечения графиков, изображенных на рис. 8.2. Здесь ось абсцисс представляет значениями подкомпонента, соответствующими левой части уравнения

$$D = F(D), \quad (8.6)$$

а ось ординат отвечает правой части этого уравнения. График левой части (8.6) представляет собой прямую, проходящую под углом в  $45^\circ$  к оси абсцисс. Правой же части уравнения отвечает возгнутая кривая ( $\alpha < 1$ ) со значением в начале координат, равным, как правило, массе полезной нагрузки корабля. (Нередко эту кривую называют покрытием.)

Принципиально различают два способа выбора точки первого приближения. В соответствии с первым из них первое приближение выбирается таким образом, чтобы разность между последующим и предыдущим

шагами итерации все время оставалась положительной. В этом случае условие завершения процедуры может иметь следующий вид:

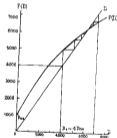


Рис. 8.2

$$|F(x_n) - F(x_{n-1})| \leq \epsilon, \quad (8.7)$$

где  $\epsilon$  — некоторое малое ранее заданное число, иными словами, мера точности вычислений.

При реализации этого способа первое приближение выбирается таким образом, чтобы его значение располагалось слева от корня уравнения, как это показано на рис. 8.2. Для его вычисления используют такое понятие, как минимально возможное значение коэффициента Нормана (по полезной нагрузке). Для военных кораблей основного класса оно никогда не бывает меньше 4. Поэтому значение первого приближения обычно определяется по формуле

$$D_1 = 4P_{\text{пл}}. \quad (8.8)$$

Второй способ предусматривает получение значения первого приближения из предыдущего этапа расчета подкомпонента. В этом случае предполагается, что значение  $D_1$  может лежать достаточно близко к корню уравнения, но занимать при этом положение как слева, так и справа от него. При этом условие завершения вычислений (8.7) примет вид

$$|F(x_n) - F(x_{n-1})| \leq \epsilon. \quad (8.9)$$

Обращаясь к графической интерпретации выражений (8.7) и (8.9), можно заметить, что если условие (8.7) обеспечивает в процессе выполнения итераций движение только от начала координат внутри клина, образованного покрытием  $F(D)$  и биссектрисой координатного угла, с вершиной в корне решения уравнения, то при реализации условия (8.9) приближение к корню может осуществляться как с одной, так и с другой стороны, как это показано на рис. 8.2.

При использовании как первого, так и второго способов встает вопрос о неудовлетворительном завершении процедуры в соответствии с условиями типа (8.7) и (8.9), так как они не отражают степени приближения решения к корню уравнения, а лишь оценивают размер шага итерации. Если угол между покрытием  $F(D)$  и прямой  $D = D$  достаточно велик, то при малых значениях  $\epsilon$  эти условия дают хорошее приближение к корню уравнения. Однако на практике обычно бывает как раз наоборот. Функции

обон частей уравнения (8.6) образуют между собой весьма малый угол, и даже при достаточно незначительной величине корня уравнения (8.6) может быть значительно удален от места пересечения вычислений в соответствии с заданным условием.

Чтобы избежать больших ошибок, неизбежных в таких случаях, в качестве условия завершения вычислительной процедуры может быть использован аналог производной функции  $F(D)$ , позволяющий прогнозировать мгновенное значение корня уравнения. В качестве основного допущения при этом используется предположение о том, что в окрестности корня функция  $F(D)$  меняется практически линейно. Аналог производной функции  $F(D)$  строится с использованием значений двух последних итераций так, что

$$\begin{aligned} \alpha_{n+1} &= -F(D_{n+1}) + F(D_{n-1}); \\ \alpha_n &= F(D_n) - F(D_{n-1}). \end{aligned} \quad (8.10)$$

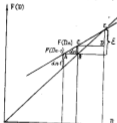


Рис. 8.3

Рассматривая подобный треугольник  $ABC$  и обозначая  $CDE$  (рис. 8.3) и обозначая через  $\epsilon$  разность между значениями истинного корня и водозмещением, отвечающим последней итерации, запишем существующие равенства отношений подобных сторон этих треугольников в виде

$$\frac{\alpha_n}{\alpha_{n-1}} \approx \frac{\epsilon - \alpha_n}{\epsilon}. \quad (8.11)$$

Тогда условие для выхода из итерационной про-

цедуры по точности определения водозмещения корабля может быть записано следующим образом

$$\frac{\epsilon - \alpha_n}{F(D_n)} < \epsilon^*, \quad (8.12)$$

где

$$\epsilon^* = \frac{\alpha_n \alpha_{n-1}}{\alpha_{n-1} - \alpha_n}. \quad (8.13)$$

Последним вопросом, который необходимо рассмотреть в этом параграфе, будет вопрос о степени алгоритмизации функции  $F(D)$ . С чисто математической точки зрения введение булевых функций в модель, т. е. ее алгоритмизация, ведет к нарушению сформулированных ранее условий, обеспечивающих сложность итерационной процедуры принципа сжатых отображений, и прежде всего условия Линнича. Как правило, при реализации алгоритмического переключения функция  $F(D)$  испытывает разрыв второго рода. Если величина этого разрыва несравнима с точностью вычисления, то такое скачкообразное изменение функции  $F(D)$  можно считать несущественным. Однако чаще встречаются случаи, когда конечная точность решения задачи становится сравнимой с величиной разрыва функции  $F(D)$ .

Тогда, учитывая, что скачкообразное изменение покрытия в большей степени сказывается на формировании условия (8.12), чем (8.7), рекомендуется в алгоритме вычислительной предусматривать оба условия. При этом, на начальной стадии процесса сложности, когда шаги итераций достаточно велики, проверяется условие (8.7), а при его выполнении дополнительно проверяется условие (8.12). В любом случае вычисления рекомендуется заканчивать, как только разность типа (8.7) изменит свой знак на обратный. Это будет означать, что те разрывы, которые приносятся в модельную функцию в результате ее алгоритмизации, придают этой функции немонотонность (осцилляцию), сравнимую с величиной шага итерации. Поэтому попытки дальнейшего уточнения решения не имеют смысла.

Иногда для повышения уверенности в полученном решении используют сравнение результатов вычислений, получаемых при реализации двух последовательных организуемых алгоритмов, отличающихся выбором точки первого приближения. Один алгоритм реализуется так, как это было описано выше, а другой — путем выбора в качестве первого приближения заведомо большого водозмещения (например,  $D_0 = 10 \cdot R_{\text{вд}}$ ) с тем, чтобы весь

процесс шел симметрично первому, но с другой стороны от корня уравнения. В результате сравнения получаемых решений ошибка вычисления может быть сведена к минимуму.

## 8.2. СОВМЕСТНОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ МАСС И ВМЕСТИМОСТИ

Совместное решение уравнений масс и вместимости, необходимость которого была показана в параграфе 7.2, обычно реализуется при определении главных элементов корабля, когда возникает сомнение в достаточной вместимости проекта, главные элементы которого определены из уравнения масс. Такая ситуация характерна для современного надводного кораблестроения вообще. Особую же остроту, как уже отмечалось, ей придает тенденция размещения все большей доли оружия и вооружения непосредственно в корпусе корабля, а также монотонное снижение плотности полезной нагрузки и ужесточение требований к обитаемости.

Традиционно методы определения главных элементов корабля разделяются на методы первого и второго приближения [286]. При этом, под методами второго приближения обычно понимаются такие методы, отличительными признаками которых по сравнению с методами первого приближения являются использование результатов эскизных проработок и более точных модельных зависимостей, построенных на основе этой дополнительной информации, а также многовариантный характер вычислений. Методы первого приближения представляются различными методами определения главных элементов на основе решения уравнения масс. С этих позиций совместное решение уравнений масс и вместимости следовало бы рассматривать как дальнейшее развитие методов первого приближения, так как при этом еще не реализуются эскизные проработки и многовариантность вычислений. Вместе с тем, в процессе определения главных элементов проектируемого корабля не находит отражения вопросы учета вместимости, что составляет основную цель выполнения эскизных проработок. Поэтому методы определения

главных элементов корабля, разработанные на основе решения системы из двух или более уравнений, следует все же отнести к особому классу задач исследовательского проектирования, занимающему промежуточное положение между методами первого и второго приближения.

С математической точки зрения совместное решение уравнений масс и вместимости представляет собой решение системы двух уравнений алгебраического или трансцендентного вида, обладающих рядом специфических особенностей, обусловленных их физическим содержанием и необходимостью реализации разрешающей процедуры в рамках САПР. С проектной точки зрения решение системы этих уравнений означает согласование проекта по массе его корпуса, комплектуемого оборудованием и возможностью размещения этого оборудования на корабле с учетом всех необходимых условий его функционирования и обитаемости личного состава.

В практике конструкторской деятельности согласование масс и вместимости проекта обычно не предусматривает такую однозначную операцию, как решение системы уравнений. Этот процесс носит последовательный характер: сначала на основе решения уравнения масс выполняется эскизная проработка (здесь, впрочем, учитывая дефицит вместимости на современных кораблях, работа начинается прямо с графической прорисовки).

Затем выполняется поверочный расчет вместимости. При этом возможны два результата такой проверки. Первый, и наиболее характерный, предполагает наличие дефицита вместимости, которому отвечает следующее неравенство:

$$V_1 > V_2 \quad (8.14)$$

Другому результату отвечает обратное неравенство:

$$V_1 < V_2 \quad (8.15)$$

Притом, если во втором случае наличия дополнительных проектных решений не требуется, то в первом случае такие решения необходимы для сокращения дефицита до величины предполагаемой точности модели.

В практике проектирования увеличение фактической вместимости для сокращения ее дефицита как правило осуществляется путем последовательного наращивания масштаба изменения принятой проектно-конструкторской схемы. В этом смысле мероприятия, обеспечивающие согласование вместимости проекта, располагаются в следующей последовательности:

- увеличение объема надстройки;
- организация полубака или удлиненного полубака;
- увеличение отношения высоты борта к осадке;
- задание новых размеров с последующей корректировкой массовой модели.

Из рассмотренных мероприятий первое затрагивает вопросы архитектурной компоновки и может быть реализовано только на основе эскизной проработки. Второе представляет собой частичную реализацию третьего мероприятия, и последнее, четвертое, — по сути предполагает решение задач заново.

Решение задачи аналитическим путем осуществляется в виде решения системы уравнений вида

$$\left. \begin{aligned} D &= \sum_{i=1}^n P_i \\ V_b &= \sum_{i=1}^n \gamma_i \end{aligned} \right\} \quad (8.16)$$

где  $n$  и  $m$  — числа составляющих правых частей уравнений масс и вместимости соответственно. Для решения системы (8.16) необходимо иметь две неизвестные. Одни из них, разумеется, водоизмещение проектируемого корабля так, как это было при решении уравнения масс. В качестве другой неизвестной, вообще говоря, могут выступать любые аргументы модели, так или иначе связанные с главными размерениями проекта. К ним относятся сами главные размерения корабля и их основные соотношения. В то же время длина корабля или отношение  $\lambda = L/B$  не могут быть выбраны в качестве второй неизвестной, т. к. эти величины определяются в основном из соображений ходкости корабля, а не вместимости. Существенное влияние на фактическую вместимость корпуса оказывает коэффициент общей полноты —  $\delta$ , но и

он слишком сильно влияет на ходкость корабля, чтобы этого не учитывать. Ширина корабля или отношение  $\epsilon = BT$  также не могут определяться из системы (8.16), поскольку они самым существенным образом влияют на поперечную остойчивость проекта. Таким образом, в качестве второй неизвестной системы (8.16) может выступать только отношение  $l = HT$  или сама величина  $H$  — высота борта проектируемого корабля. В этом случае система уравнений (8.16) примет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} D &= \sum_{i=1}^n P_i(D, l) \\ V_b(D, l) &= \sum_{i=1}^n \gamma_i(D, l) \end{aligned} \right\} \quad (8.17)$$

Интересно заметить, что решение системы (8.17) в полной мере соответствует третьему из перечисленных выше проектно-конструкторских мероприятий и частично второму. Развитие будет заключаться только в том, что при выполнении проектно-конструкторских мероприятий реализуются ограничения типа неравенств, в то время как при решении системы уравнений может обеспечиваться только выполнение ограничений типа равенств. С точки зрения проектирования это означает, что если на корабле образовался избыток вместимости, то, в соответствии с решением (8.17), проект будет иметь заниженную высоту борта. При практическом же проектировании изменения в проекте происходят только в случае дефицита вместимости. На это обстоятельство один раз будет обращено внимание при описании процедуры решения системы (8.17).

Решение системы (8.17) может быть получено на основе той же общей теории, которая излагалась в параграфе 8.1 применительно к уравнению масс. В рамках этого подхода принцип скалярных отображений формулируется относительно двух неизвестных  $D$  и  $l$ , что можно свести к вопросу о существовании неподвижной точки при отображении квадрата в себя.

Рассмотрим квадрат  $Q$ , лежащий на координатной плоскости  $R^2$ , такой, что декартовы координаты всех его точек удовлетворяют неравенствам  $0 \leq x \leq 1$ ,  $0 \leq y \leq 1$ . Пусть  $F$  — отобра-

ривное отображение квадрата  $Q$  в себя. Это значит, что каждая точка  $p$  из  $Q$  переходит в определенную точку  $F(p)$  этого же квадрата — образ точки  $p$ , причем образы близких точек тоже близки. Задать такое отображение — значит указать две числовые непрерывные функции  $\varphi(x, y)$  и  $\psi(x, y)$ , которые заданы в квадрате  $Q$  и удовлетворяют неравенствам

$$0 \leq \varphi(x, y) \leq 1, \quad 0 \leq \psi(x, y) \leq 1. \quad (8.18)$$

Если  $(x_0, y_0)$  — точка из квадрата  $Q$ , то ее образом при таком отображении  $F$  будет точка с координатами  $\varphi(x_0, y_0)$ ,  $\psi(x_0, y_0)$ , тоже лежащая в квадрате ввиду неравенств (8.18).

Здесь необходимо уточнить, что между понятиями отображение и функция существует следующее соотношение. Первое из них мы употребляем в широком смысле, как отображение любого множества в любое (то же самое или другое) множество. Слово функция всегда обозначает отображение какого-то множества в числовую прямую.

Условия существования решения системы (8.17) в виде неподвижной точки сформулированы Л. Э. Я. Брауэром (1881—1966) в теореме о неподвижной точке [394]: всякое непрерывное отображение  $F$  квадрата в себя имеет по крайней мере одну неподвижную точку, т. е. такую точку  $x$ , что

$$F(x) = x. \quad (8.19)$$

Чтобы дать наглядное доказательство этой теореме надо представить себе график его отображения  $F$ . При этом пара, состоящая из точки и ее образа, описывается четырьмя координатами. Иными словами, график отображения  $F$  есть некоторая кривая поверхность в четырехмерном пространстве. Для ее представления можно воспользоваться двумя последовательными трехмерными изображениями [394]. Однако можно пойти и другим путем.

Аналогично тому рассуждению, которое было проведено в предыдущем параграфе на основе метода последовательных приближений применительно к уравнению масс, решение системы (8.17) может быть получено из счет последовательного наращивания задан, т. е. в виде двукратного вложенного цикла.

Тогда от решения задачи в первом приближении совместное решение уравнений масс и вместимости будет отличаться только организацией внешнего цикла по неизвестной  $t = NUT$ , как это показано на рис. 8.4. Для его реализации на основе материала, изложенного в параграфе 7.2, выполним следующие преобразования.



Рис. 8.4

Учитывая, что выражение (7.30) дает завышенное значение фактического объема корпуса корабля, а (7.35) заниженное, будем использовать их среднее значение для определения фактической вместимости корпуса  $V_4^*$ :

$$V_4^* = D \left[ 1 + \frac{\alpha}{8} \left( \frac{H}{T} - 1 \right) + \frac{1}{4} \frac{\alpha}{8} \left( \frac{\alpha}{8} - 1 \right) \left( \frac{H}{T} - 1 \right)^2 \right], \quad (8.20)$$

где  $D$  при условии, что плотность воды равна 1, совпадает с  $V$ .

Чтобы значение  $V_4^*$  было близко к реальным прототипам, необходимо ввести два коэффициента:  $K_{вз}$  — коэффициент развала борта (по прототипу) и  $K_{вс}$  — коэффициент учитываемой



наличие объема, неудобных для размещения какого-либо оборудования (иногда с помощью этого коэффициента учитывают также коммуникационные помещения: коридоры, тамбуры и т. п.). Для окончательного определения фактической вместимости проектируемого корабля необходимо учесть объем его надстроек. Конфигурация надстроек, их разноточность, а следовательно и объем в значительной степени зависят от архитектурно-композиционных решений, принимаемых при графической прорисовке. Преимущества же совместного решения уравнений масс и вместимости в значительной степени определяются именно возможностью не выполнять эти прорисовки на данном этапе определения главных элементов проекта. В связи с этим объем надстроек может быть определен весьма приближенно, что существенно снижает точность всей модели и, в частности, делает бессмысленным ее дальнейшее расширение на систему с большим числом уравнений. В рассматриваемой же задаче остается только две возможности: рассчитывать объем надстройки как долю от объема корпуса (или всего корабля) путем пересчета ее с прототипа или же задавать этот объем в абсолютных величинах. Так или иначе, объем надстройки может быть определен из следующего выражения

$$V_{\text{над}} = \{V_4^1 K_{\text{над}} V_{\text{кор}}\}. \quad (8.21)$$

Тогда, с учетом формул (8.20) и (8.21) фактическая вместимость корабля может быть получена из следующего выражения:

$$V_4 = K_{\text{св}} (V_4^1 K_{\text{кор}} + V_{\text{над}}). \quad (8.22)$$

Для того, чтобы привести второе уравнение системы (8.16) к виду, позволяющему применить принцип скалярных отображений, его необходимо разрешить относительно второй неизвестной системы  $t = HT$ . Обозначая правую часть этого уравнения через

$$V_5 = \sum_{j=1}^n V_j, \quad (8.23)$$

и подставляя в него выражение (8.22), получим

$$K_{\text{св}} (V_4^1 K_{\text{кор}} + V_{\text{над}}) = V_5. \quad (8.24)$$

Для решения поставленной задачи выполним ряд эквивалентных преобразований. Перепишем (8.24) в следующем виде

$$K_{\text{св}} K_{\text{кор}} D \left[ 1 + \frac{\alpha}{\delta} \left( \frac{H}{T} - 1 \right) + \frac{1}{4\delta} \left( \frac{\alpha}{\delta} - 1 \right) \left( \frac{H}{T} - 1 \right)^2 \right] = V_5 - K_{\text{св}} V_{\text{над}} \quad (8.25)$$

или

$$\frac{1}{4\delta} \left( \frac{\alpha}{\delta} - 1 \right) x^2 + \frac{\alpha}{\delta} x + 1 - \frac{V_5 - K_{\text{св}} V_{\text{над}}}{K_{\text{св}} K_{\text{кор}} D} = 0, \quad (8.26)$$

где  $x = HT - 1$ .

Решая известным способом уравнение (8.26) относительно  $x$ , получим

$$x_{1,2} = \frac{-\bar{\psi} \pm \sqrt{\bar{\psi}^2 - \bar{\psi}(\bar{\psi} - 1)[1 - (V_5 - K_{\text{св}} V_{\text{над}})/K_{\text{св}} K_{\text{кор}} D]}}{1/2\bar{\psi}(\bar{\psi} - 1)}, \quad (8.27)$$

где  $\bar{\psi} = \alpha/\delta = \frac{1}{\psi}$ .

Исходя из необходимости иметь только положительное значение  $x$ , принимаем положительный знак радикала и выполним последовательные преобразования

$$x = \frac{H}{T} - 1 = \frac{\sqrt{1 + (\bar{\psi} - 1)/\bar{\psi}[(V_5 - K_{\text{св}} V_{\text{над}})/K_{\text{св}} K_{\text{кор}} D - 1]} - 1}{0.5(\bar{\psi} - 1)}$$

или

$$\frac{H}{T} = \frac{\sqrt{1 + (\bar{\psi} - 1)/\bar{\psi}[(V_5 - K_{\text{св}} V_{\text{над}})/K_{\text{св}} K_{\text{кор}} D - 1]} - 1}{0.5(\bar{\psi} - 1)} + 1$$

или

$$t = \left( \sqrt{1 + (\bar{\psi} - 1)/\bar{\psi}[(V_5 - K_{\text{св}} V_{\text{над}})/K_{\text{св}} K_{\text{кор}} D - 1]} - 1 + 0.5(\bar{\psi} - 1) \right) / 0.5(\bar{\psi} - 1). \quad (8.28)$$

Имея в виду, что выражение для потребных объемов  $V_i$  раскрывается как функция от обоих неизвестных, (8.28) примет вид выражения (8.2) из параграфа 8.1

$$\tau = \frac{\sqrt{1 + (\bar{\varphi} - 1)/\bar{\varphi}[(V_{\text{ср}}(D, l) - K_{\text{пр}}V_{\text{зад}})/K_{\text{пр}}K_{\text{ср}}D - 1]} + 0.5(\bar{\varphi} - 1) - 1}{0.5(\bar{\varphi} - 1)} \quad (8.29)$$

В остальном внешний цикл, обеспечивающий решение системы (8.17) по второй переменной, ничем не отличается от внутреннего, уже рассмотренного нами в параграфе 8.1. Следует только заметить, что функция  $F(\bar{\varphi})$ , в отличие от функции  $F(D)$  пересекает биссектрису координатного угла под углом, близким к прямому, как это показано на рис. 8.5. В этом случае сходимость будет носить характер знакопеременной последовательности. Геометрически это означает, что оператор сжатия организует спиральную траекторию с центром в неподвижной точке. Эта особенность создает необходимость все применимые условия выхода из процедуры сравнивать только с абсолютными значениями разностей, вычисляемых относительно предыдущего и последующего шагов итерации.

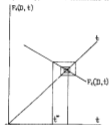


Рис. 8.5

При разработке альтернатив, обеспечивающих совместное решение уравнений масс и вместимости, следует иметь в виду еще одно обстоятельство, на которое уже указывалось в настоящем параграфе. Речь идет о том, что в результате решения этой задачи величина  $l$  может оказаться недопустимо большой или наоборот — малой, с точки зрения других свойств корабля, например остойчивости. В этом случае рекомендуется устанавливать среднестатистические границы допустимых значений  $l$ , и в том случае, если решение системы (8.17) не будет укладываться в названный промежуток, при-

сваивать величине  $l$  граничные значения и считать, что оставшийся дефицит (или избыток) вместимости будет компенсирован конструктивными мероприятиями на более поздних стадиях проектирования. Оправданием такого подхода служит низкая точность вычисления потребных и фактических (относительно надстройки) объемов, о чем уже упоминалось выше.

### 8.3. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛАВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВО ВТОРОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

Методы определения главных элементов корабля во втором приближении предназначены для уточнения результатов первого приближения на основе эскизных проработок, использования более корректных проектных зависимостей и вариантного анализа. Наиболее известными методами второго приближения являются графоаналитический метод Д. В. Доробостайского (при варьировании относительными характеристиками проекта) и вариантный метод Г. И. Погова (при варьировании абсолютными значениями характеристик) [286]. Здесь будет рассмотрен первый из названных методов.

Этот метод определения главных элементов корабля предусматривает выполнение работы в два основных этапа. На первом этапе решаются следующие задачи:

1. Предварительное определение водоизмещения и главных размерений корабля.
2. Ориентировочная оценка мощности главных механизмов, обеспечивающей заданную скорость полного хода.
3. Разработка эскизов общего расположения, позволяющих установить принципиальную возможность размещения на корабле вооружения, боезапаса, главных механизмов, топлива, личного состава.
4. Определение и выбор ряда удельных характеристик, параметров и линейных размеров, необходимых для второго этапа.
5. Выбор архитектурного типа корабля, определение числа палуб, высоты борта и т. д.

Для предварительного определения главных элементов корабля может быть использован любой из методов, изложенных в параграфах 8.1 и 8.2.

Целью второго этапа является удовлетворение требованиям, предъявляемым к свойствам проектируемого корабля, уточнение составляющих масс выгрузки, выраженных через водонизмещение, относительную длину  $l$ , относительную ширину  $b$  и относительную осадку  $t$ :

$$F(D, l, b, t) = 0, \quad (8.30)$$

Относительные размеры корабля  $l$ ,  $b$  и  $t$  связаны с отношениями главных размеров зависимостями вида:

$$\begin{aligned} l &= LD^{0.8} = (\tau\lambda^2\delta\gamma)^{0.8}, \\ b &= BD^{0.7} = b\lambda = (\tau(\delta\lambda\gamma))^{0.7}, \\ t &= TD^{0.6} = b\tau = (1.8\delta\lambda\gamma\tau)^{0.6}. \end{aligned} \quad (8.31)$$

Принимая  $\gamma = 1 \text{ т/м}^3$  и произвольно варьируя  $\lambda$ ,  $\tau$  и  $\delta$ , можно решить составленное уравнение (8.30) относительно водонизмещения корабля  $D$ .

При варьировании характеристик  $\lambda$ ,  $\tau$  и  $\delta$  задаются три значения каждой из них и в результате соответствующей их комбинации составляется 27 уравнений масс. Задаваясь числовыми значениями  $\lambda$ ,  $\tau$  и  $\delta$ , крайние их значения принимаются предельными для данного класса кораблей, а третье значение — средним арифметическим между ними.

Составление и решение уравнений масс производится в форме табл. 8.1. При определении массы механизмов и запасов топлива предварительно определяются адмиралтейские коэффициенты для скорости полного и экономического ходов.

Определение адмиралтейских коэффициентов для разных комбинаций  $\lambda$ ,  $\tau$  и  $\delta$  производится по выражению

$$C = 10.8 \frac{\eta_a}{0.126(\tau + 0.836\delta)\delta^2}, \quad (8.32)$$

Вывод уравнения (8.32) рассматривался в параграфе 5.3. Он получается путем подстановки в выражение для определения валовой мощности механизмов методом адмиралтейских коэффициентов (5.21) формул (5.13) и (5.14). Напомним, что в при-

Таблица 8.1

№ варианта	б <sub>1</sub>			б <sub>2</sub>			б <sub>3</sub>			Вычисление адмиралтейского коэффициента для полного хода
	б <sub>1</sub>			б <sub>2</sub>			б <sub>3</sub>			
	λ <sub>1</sub>	λ <sub>2</sub>	λ <sub>3</sub>	λ <sub>1</sub>	λ <sub>2</sub>	λ <sub>3</sub>	λ <sub>1</sub>	λ <sub>2</sub>	λ <sub>3</sub>	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	$f = \left(\frac{\Delta_1}{B_1}\right)^{0.7}$ $b = \left(\frac{t}{B_1\gamma}\right)^{0.7}$ $t = \left(\frac{1}{B_1\tau\gamma}\right)^{0.6}$ $(RZ)_{a, \lambda} = \frac{\Sigma_{a, \lambda} L}{V}$ $(C_{1, \lambda})_{a, \lambda} = f(RZ)_{a, \lambda}$ $(PZ)_{a, \lambda} = \frac{\Sigma_{a, \lambda} 0.514}{\sqrt{L}}$ $C_{1, \lambda}^2 - C_{2, \lambda}^2 = C_{3, \lambda}^2 + C_{4, \lambda}^2$ $C_{1, \lambda} = \sqrt{\frac{C_{3, \lambda}^2 + C_{4, \lambda}^2}{1 - C_{2, \lambda}^2}}$
2	1	1	2	1	1	2	1	1	2	
3	1	1	3	1	1	3	1	1	3	
4	1	2	1	1	2	1	1	2	1	
5	1	2	2	1	2	2	1	2	2	
6	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
7	1	3	1	1	3	1	1	3	1	
8	1	3	2	1	3	2	1	3	2	

№ табл.	Расшифровка	$\delta_1$				$\delta_2$				$\delta_3$					
		$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_6$	$\lambda_7$	$\lambda_8$	$\lambda_9$	$\lambda_{10}$	$\lambda_{11}$	$\lambda_{12}$	$\lambda_{13}$	$\lambda_{14}$
9	$C_{n,1} = \frac{\eta}{0,12467 + 0,8385\eta} C_{n,0}$	5	6	6	6	7	7	7	7	8	8	8	8	9	9
10		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

Вычисление адвиртайского коэффициента для экономического хода

$$(Rn)_{n,1} = \frac{Z_{n,1} \delta_1}{\eta}$$

$$(K_{n,1})_{n,1} = f(Rn)_{n,1}$$

$$(P)_{n,1} = \frac{Z_{n,1} \delta_1 H}{\sqrt{g l}}$$

$$(C_{n,1})_{n,1} = \frac{R_{n,1}^2}{2} K$$

$$(B_{n,1})_{n,1} = \frac{1}{2} \eta_{cr} + \eta_{sp} + \eta_{st} + \eta_{cor}$$

$$C_{n,1} = \frac{\eta_{sp}}{0,12467 + 0,8385\eta} C_{n,0}$$

$$F(D^2, l, \delta, \eta) = 0$$

$$P_{sp} = \delta_1 \frac{P^2}{l} D^{10}$$

Вычисление нагрузки макс в главных размерах

№ табл.	Расшифровка	$\delta_1$				$\delta_2$				$\delta_3$					
		$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_6$	$\lambda_7$	$\lambda_8$	$\lambda_9$	$\lambda_{10}$	$\lambda_{11}$	$\lambda_{12}$	$\lambda_{13}$	$\lambda_{14}$
17	$P_{sp} = a_1 D^{10} + a_2 D^{12} + a_3 + a_4 D^{13} + a_5$	5	6	6	6	7	7	7	7	8	8	8	8	9	9
18	$P_{cr} + P_{st} = a_6 D^{10} + a_7 D^{11}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
19	$P_{cr} = a_8 D$	5	6	6	6	7	7	7	7	8	8	8	8	9	9
20	$P_{st} = a_9 D^2$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
21	$P_{sp} + P_{cr} + P_{st} = const$	5	6	6	6	7	7	7	7	8	8	8	8	9	9
22	$l = D^{10}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
23	$B = B_0 D^{10}$	5	6	6	6	7	7	7	7	8	8	8	8	9	9
24	$T = T_0 D^{10}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

Вычисление для построения стратигических кривых

$$0,75 = \frac{D^{10} P^2}{C}$$

$$b$$

$$t$$

$$C_c$$

$$C_{max}$$

$$D^2$$

близкой зависимости для величины смоченной поверхности корпуса главные размерения замещены из относительными величинами.

Величина относительного коэффициента  $\eta_r$  принимается по прототипу.

Составляющие полного коэффициента сопротивления

$$\zeta = \zeta_{\text{от}} + \zeta_{\text{фн}} + \zeta_{\text{м}} + \zeta_{\text{сн}} \quad (8.33)$$

определяются следующим образом.

Сопротивление трения можно определить по формулам (5.16), (5.17), приведенным в п. 5.3.

Коэффициент сопротивления выступающих частей  $\zeta_{\text{сн}}$  для надводных военных кораблей определяется как сумма коэффициентов сопротивления характерных выступающих частей, значения которых известны по результатам ранее проведенных испытаний. К таким выступающим частям относятся патрубки системы охлаждения энергетической установки, руль, скуловые килы, кронштейны линии гротных валов и т. п. Таким образом, например, для двухвалных кораблей значение  $\zeta_{\text{сн}}$  составляет около  $0,80 \cdot 10^{-3}$ .

Коэффициент сопротивления формы  $\zeta_{\text{фн}}$  и коэффициент волнового сопротивления  $\zeta_{\text{м}}$  в сумме составляют коэффициент остаточного сопротивления

$$\zeta_{\text{от}} = \zeta_{\text{фн}} + \zeta_{\text{м}} \quad (8.34)$$

Коэффициент остаточного сопротивления  $\zeta_{\text{от}}$  рассчитывается по данным прототипа с использованием графиков типа Мурагина—Луценко или И. В. Гирса [286]. Если воспользоваться первым из них, как рекомендует Д. В. Дорогостайский, то коэффициент остаточного сопротивления прототипа умножается на поправочные коэффициенты, зависящие от  $\lambda$ ,  $\tau$  и  $\delta$ , т. е.

$$\zeta_{\text{от}} = \zeta_{\text{от} \cdot \tau} k_{\lambda} k_{\tau} k_{\delta} \quad (8.35)$$

Если воспользоваться графиками И. В. Гирса, то поправочные коэффициенты будут зависеть от  $l = LD^{0,75}$ ,  $\varphi = \delta/\beta$  и  $\tau = \delta/T$ , т. е.

$$\zeta_{\text{от}} = \zeta_{\text{от} \cdot \tau} k_{\lambda} k_{\varphi} k_{\tau} \quad (8.36)$$

Помимо сказанного выше, коэффициент остаточного сопротивления пересчитывается в функции от числа Фруда

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gl}}$$

Аналогичным образом находится адмиралтейский коэффициент для экономического хода. Здесь, как правило, скорость экономического хода является величиной заданной.

После определения значений адмиралтейских коэффициентов переходят к составлению и решению уравнений масс. Определен значения всех входящих в это уравнение постоянных коэффициентов и подставив значения варьируемых величин  $l$ ,  $b$  и  $\lambda$ , в итоге получим уравнение с одним неизвестным  $D$ . Решение этого уравнения можно производить одним из ранее рассмотренных методов.

Зная водоизмещение из строк 16, 17, 18, 19, 20, 21 и 22 табл. 8.1, находим массы по разделам нагрузки для всех вариантов. Сумма масс по разделам нагрузки должна дать величину найденного водоизмещения, что является проверкой правильности расчета. Если расчет производится при постоянной мощности механизмов, то расчет величины адмиралтейского коэффициента для полного хода (строки 4–9 табл. 8.1) производить не надо. Здесь мощность механизмов и, следовательно, их массы будут постоянны для всех вариантов, и величину  $P_{\text{м}}$  следует перенести из строки 18 в строку 22. Соответственно изменится и уравнение масс.

По известному водоизмещению не составляет труда найти главные размеры корабля  $L$ ,  $B$  и  $T$ . Используя результаты расчетов, сделанные в табл. 8.1, строят основные графики зависимости водоизмещения проекта от  $\lambda$  и  $\tau$  при постоянном  $\delta$ , которые приведены на рис. 8.6. Для анализа на каждом графике строят промежуточные (интерполяционные) кривые.



Рис. 8.6

Построенные основные графики представляют сетку вариантов кораблей, удовлетворяющих уравнениям масс и плавучести с различными главными размерениями.

Помимо удовлетворения уравнениям масс и плавучести, проектируемый корабль должен удовлетворять целому ряду предъявляемых к нему, часто противоречивых, требований. Если расчет производится при постоянной скорости хода, то мощность механизмов может быть ограничена некоторыми максимальными и минимальными пределами. Если расчет производится при постоянной мощности, то ограничиваются пределы по скорости хода. Минимальная длина или ширина корабля могут быть установлены по условиям размещения. Наконец, корабль должен удовлетворять ряду требований в части остойчивости, ильостируемости и др.

Установление этих требований применительно к данному проекту корабля и аналитическое их выражение позволяют нанести на основной график ряд ограничительных кривых, которые образуют на основном графике узкую область реальных вариантов проектируемого корабля. Выбирая в этой области вариант, отвечающий минимальному (максимальному) значению того или иного параметра, например водоизмещения, принимаемого в качестве критерия предпочтительности, находим наилучшее в смысле выбранного критерия соотношение длинных элементов корабля. Рассмотрим более подробно методику расчета и построения ограничительных кривых.

#### Ограничительные кривые постоянной мощности полного хода

В том случае, если скорость полного хода корабля задана в задании на проектирование ТТЗ, целесообразно бывает установить некоторый диапазон мощности или определить те варианты проекта, которые обеспечивают заданную скорость при вполне определенной мощности механизмов. Ранее в табл. 8.1 были найдены значения адмиралтейских коэффициентов для всех 27 вариантов, что позволяет найти для этих же вариантов мощность механизмов на полном ходу (строка 26, табл. 8.1). По результатам расчета для каждого значения  $\delta$  строится вспомога-

тельный график зависимости  $WPS = f(\lambda, \tau)$ , как показано на рис. 8.7.

Перенос точки пересечения построенных кривых с прямой, отвечающей заданному значению мощности, на основной график, на основной график, по трем точкам строится ограничительная кривая по мощности. Все варианты проекта, лежащие на этой кривой, будут иметь заданную скорость хода при одинаковой мощности механизмов.

В случае необходимости таких кривых можно построить несколько для разных значений мощности.

#### Ограничительные кривые постоянной скорости полного хода

Тогда, когда механизмы и их мощность выбраны заранее, на основном графике строят кривые вариантов, имеющих равные скорости полного хода. Для этого сначала надо определить скорость хода для каждого из 27 рассматриваемых вариантов корабля при заданной постоянной мощности механизмов. Задавая произвольно тремя значениями скорости хода так, как это было сделано ранее, определяют соответствующие значения адмиралтейских коэффициентов. Зная адмиралтейский коэффициент для каждого варианта, определяют три значения мощности механизмов при трех заданных скоростях.

Построив графики  $v = f(WPS)$ , определяют скорость, соответствующую первоначально выбранной мощности механизмов. Расчет в этом случае значительно усложняется, так как необходимо найти значения адмиралтейских коэффициентов и мощности механизмов не для 27, а для 81 варианта.

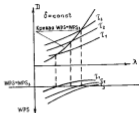


Рис. 8.7

Далее, аналогично указанному ранее строят вспомогательный график  $r = f(\lambda, \tau)$  и переносят на основной график точки пересечения построенных кривых с прямой, отвечающей заданной скорости, на основном графике получают кривую равных скоростей хода.

#### Ограничительные кривые постоянных линейных размеров корабля

Часто по условиям размещения на корабле вооружения, боезапаса, механизмов, топлива и т. п. или ограничений, связанных с глубинами фарватеров, размерами каналов, доков, стапельных мостов и т. д. могут быть установлены те или иные минимальные или максимальные допустимые главные размеры корабля. В этом случае с помощью изложенного выше приема на основных графиках могут быть нанесены ограничительные кривые постоянных линейных размеров корабля. Для этого можно воспользоваться результатами расчетов, приведенными в табл. 8.1.

#### Ограничительные кривые по остойчивости корабля

Одним из основных факторов, влияющих на выбор оптимальных главных размеров корабля, является остойчивость. Требования к остойчивости проектируемого корабля могут быть выражены через следующие основные показатели:

- начальная поперечная метacentрическая высота;
- предельная скорость выдерживаемого кораблем ветра;
- угол крена корабля на циркуляции;
- угол заката диаграммы остойчивости;
- период бортовой качки корабля;
- запас остойчивости и др.

Построение ограничительных кривых не обязательно должно производиться по всем перечисленным выше показателям. В зависимости от класса проектируемого корабля, его конструкции, архитектуры и т. д. следует отобрать из перечисленных выше такие показатели, требования по предельным значениям которых будут наиболее трудно выполнимы.

Покажем, как производится расчет и построение ограничительных кривых по некоторым из перечисленных выше показателей в методе Д. В. Даровостайского.

1. Начальная поперечная метacentрическая высота при нормальном или стандартном водоизмещении определяется для каждого из 27 вариантов значений  $\lambda$ ,  $\tau$  и  $\delta$  по известной зависимости

$$h = z_1 + r - z_2.$$

Значения  $z_1$ ,  $r$  и  $z_2$  определяются по любой из известных приближенных зависимостей. Необходимые для табл. 8.1. В эту таблицу удобно записать и полученные значения начальной поперечной метacentрической высоты. Если расчет производится для стандартного водоизмещения, то необходимо воспользоваться формулами перехода.

Далее, аналогично тому как это делалось для скорости и мощности механизмов, строится вспомогательный график

$$h = f(\lambda, \tau) \text{ при } \delta = \text{const}$$

и проводится горизонталь, отвечающая заданному минимальному значению  $h$ . Полученные точки пересечения прямой и кривых  $h = f(\lambda, \tau)$  переносятся на основной график, приведенный на рис. 8.8, и по полученным точкам строится ограничительная кривая.

Все точки вариантов, лежащие на этой кривой, обладают заданной величиной остойчивости. Точки, лежащие правее или левее от ограничительной кривой, имеют большую или меньшую начальную остойчивость.

2. Ограничительную кривую, по предельной скорости выдерживаемого кораблем ветра Д. В. Даровостайский предлагает построить применительно к предельному углу крена при статическом действии ветра.

Исходя из метacentрической формулы остойчивости, угол крена при статическом действии ветра и при стандартном водо-



Рис. 8.8

изменения корабля определится из равенства кренящего и восстанавливающего моментов

$$M_{кр} = M_{вос} = D_{кр}(\rho_{кр})_{max} \theta; \quad (8.37)$$

$$\theta = M_{кр}/D_{кр}(\rho_{кр})_{max}. \quad (8.38)$$

Величину кренящего момента относительно центра бокового давления можно определить с помощью рис. 8.9, исходя из величины заданного давления ветра  $p$ , т/м<sup>2</sup>.

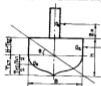


Рис. 8.9

Здесь приблизительно принимаются:

- центр парусности надстроек  $O_3$  лежит в центре тяжести их боковой поверхности;
- центр парусности корпуса  $O_1$  лежит в середине высоты надводного борта;
- центр бокового сопротивления  $O_2$  лежит в середине осадки корабля.

Тогда

$$M_{кр} = p(F_n(z_0 + H - T_{кр})/2 + F_k H/2), \quad (8.39)$$

где  $F_n$  — площадь парусности надстроек;  $F_k$  — площадь парусности корпуса;  $z_0$  — возвышение центра парусности надстроек.

Подставляя (8.39) в (8.38), получим

$$\theta = p/D_{кр}(\rho_{кр})_{max} [F_n(z_0 + H - T_{кр})/2 + F_k H/2]. \quad (8.40)$$

Будем считать, что максимально допустимый угол крена корабля при статическом действии ветра равен углу, при котором верхняя палуба входит в воду. Тогда

$$(H - T_{кр})/2(B/2) = tg\theta_{max}.$$

Приблизительно можно принять

$$tg\theta_{max} \approx \theta_{max} = \Delta H - T_{кр}/B. \quad (8.41)$$

Приравняв (8.40) к (8.41) и решив полученное уравнение относительно  $(\rho_{кр})_{max}$ , получим

$$(\rho_{кр})_{max} = pB/2D_{кр}(H - T_{кр})[F_n(z_0 + H - T_{кр})/2 + F_k H/2]. \quad (8.42)$$

Площадь парусности борта  $F_k$  может быть определена из выражения  $F_k = L(H - T_{кр})$ , а площадь парусности надстроек, как часть от площади борта  $F_n = kF_k$ , где  $k$  определяется по прототипу.

В связи с тем, что при выводе выражения (8.42) использовалась метациентрическая формула, справедливая для малых наклонений, погрешность расчета, как правило, не превышает 12%, но в ряде случаев может достигать 20% [286]. Определим по выражению (8.42) максимально допустимое, с точки зрения крена корабля при статическом действии ветра, значение начальной метациентрической выгоды, для каждого из вариантов на вспомогательном графике  $k_{кр} = f(\Delta, \psi)$  при  $\delta = \text{const}$  строит кривые  $(\rho_{кр})_{max} = f(\Delta, \psi)$ .

Точки пересечения построенных кривых позволяют получить на основном графике ограничительную кривую по остойчивости корабля при действии ветра.

3. Ограничительная кривая по показателю заданного максимального допустимого крена корабля на циркуляции может быть построена с помощью известной формулы Г. А. Фирсова

$$\theta_1^2 = 1.4v^2(z_0 - T_{кр})/(\rho_{кр}L), \quad (8.43)$$

где  $v$  — скорость полного хода корабля, м/с.

4. Ограничительная кривая по заданной величине периода бортовой качки корабля может быть построена при помощи зависимости

$$\tau = \frac{CB}{\sqrt{\rho_{кр}}}. \quad (8.44)$$

Зная величину  $k_{кр}$  для каждого варианта, находят величину периода качки по выражению (8.44) и заносят полученные значения в табл. 8.1. Это дает возможность аналогично предыдущему построить вспомогательный график  $\tau = f(\Delta, \psi)$ , а затем по заданному значению периода бортовой качки на основном графике строится ограничительная кривая. Построенная таким



образом ограничительная кривая даст на основном графике совместно с ранее построенной кривой, отвечающей  $h_{\text{вн}}$ , некоторую, отмеченную на рис. 8.8, штриховой линией область возможных значений вариантов проекта, удовлетворяющих двум выдвинутым выше требованиям.

5. Ограничительная кривая по непотопляемости может быть представлена кривой по предельному углу крена корабля при несимметричном затоплении расчетного эквивалентного отсека. Ее можно построить, воспользовавшись известными метацентрическими формулами устойчивости поврежденного корабля.

Начальная метацентрическая высота корабля после затопления отсека третьей категории может быть найдена из выражения (см. 5.34)

$$h_{\text{вн}} = h_{\text{сг}} + v_{\text{от}}(T + v_{\text{от}}/2)(2(S - s)) - z_0 - (h_{\text{вн}}/v_{\text{от}})lD. \quad (8.45)$$

Угол крена в градусах

$$\theta = 57,3v_{\text{от}}(y_0 - y_0')/l(Dh_{\text{вн}}). \quad (8.46)$$

Подставляя в выражение (8.46) величину  $h_{\text{вн}}$  из (8.45), получим

$$\theta = 57,3v_{\text{от}}(y_0 - y_0')/l(Dh_{\text{вн}} + v_{\text{от}}(T + v_{\text{от}}/2)(S - s) - z_0 - h_{\text{вн}}/v_{\text{от}}). \quad (8.47)$$

Так как крен при затоплении расчетного числа отсеков обычно не превышает 10 град., то, задаваясь минимально допустимой высотой надводного борта поврежденного корабля  $H_{\text{вн}}$ , приближенно будем иметь

$$\text{tg } \theta \approx \theta = 2(H - T - v_{\text{от}}/2)(S - s) - H_{\text{вн}}/lB. \quad (8.48)$$

Приравняв (8.47) к (8.48) и решая полученное уравнение относительно  $h_{\text{вн}}$ , получим аналитическое выражение для минимального значения поперечной метацентрической высоты, удовлетворяющей требованиям непотопляемости в части угла крена и высоты надводного борта,

$$(h_{\text{вн}})_{\text{вн}} = v_{\text{от}}(57,3B(y_0 - y_0')/2(H - T) - v_{\text{от}}/2)(S - s) - H_{\text{вн}} - (T + v_{\text{от}}/2)(S - s) - z_0 - (h_{\text{вн}}/v_{\text{от}})lD. \quad (8.49)$$

Напомним, что входящие в выражение (8.49) элементы поврежденного корабля и эквивалентного отсека для случая, представленного на рис. 8.10, могут быть найдены по приближенным

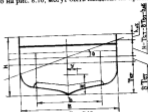


Рис. 8.10

зависимостям. Объем затопленного отсека

$$v_{\text{от}} = \mu\beta(BT + bT - bh_{\text{вн}})l/2, \quad (8.50)$$

где  $\beta$  — коэффициент полноты мидель-шпангоута;  $l$  — длина затопленного отсека;  $\mu$  — коэффициент проницаемости (степени загроможденности объема судонным оборудованием) отсека;  $h_{\text{вн}}$  — высота второго дна.

Потерянная площадь ватерлинии

$$s = l(B + b)/2.$$

Площадь ватерлинии

$$S = \alpha LB.$$

Аппликата центра ватерлинии объема

$$z_0 = z_0.$$

Ордината центра тяжести потерянной площади ватерлинии

$$y_0 = (B - b)/4.$$

Ордината центра тяжести объема  $v_{\text{от}}$

$$y_0' = y_0.$$

Ордината центра тяжести действующей площади ватерлинии

$$y_f = sy, l(S - l).$$

Потерянный момент инерции ватерлинии

$$I_{\text{пот}} = l \frac{(B + b)^2}{96} + sy^2 + (S - l)y_f^2. \quad (8.51)$$

Определив по выражению (8.49) значения  $(R_{\text{ог}})_{\text{ог}}$  для каждого из вариантов, на вспомогательном графике для  $h = f(\lambda, \tau)$  строим кривые  $(R_{\text{ог}})_{\text{ог}} = f(\lambda, \tau)$ . Точки пересечения этих кривых позволяют построить на основном графике ограничительную кривую минимальных значений остойчивости из условий непотопляемости.

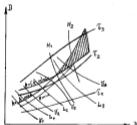


Рис. 8.11

ных размеров проектируемого корабля и с ограничительными кривыми по его основным свойствам для  $B = \text{const}$ . На графике заштрихована зона, в пределах которой рассматриваемые элементы корабля удовлетворяют предъявленным требованиям.

Таким образом, основными преимуществами изложенного выше графоаналитического метода являются:

1. Графическое изображение результатов расчета, обеспечивающее анализ и выбор оптимального варианта проектируемого корабля.

2. Возможность учета при анализе графиков основных требований, предъявляемых к свойствам проектируемого корабля.

К недостаткам метода следует отнести:

1. Трудность некоторых вычислений и графических построений.

2. Усложнение вычислений и анализа гладкости при изменении главных размерений корабля в результате замысла их безразмерными относительными величинами.

3. Принятие за основу исследований приближенных аналитических зависимостей, каждая из которых вносит значительную погрешность в результаты расчета.

Недостаток графоаналитического метода определения главных элементов корабля Д. В. Дорогоостайского, связанный с использованием относительных величин, отсутствует в другом графоаналитическом методе, разработанном профессором Г. И. Поповым. Содержание и особенности применения этого метода подробно изложены в [286].

## РАЗДЕЛ IV

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ЧЕРТЕЖА И ЧЕРТЕЖЕЙ ОБЩЕГО РАСПОЛОЖЕНИЯ

#### Глава 9. СПОСОБЫ ПОСТРОЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ЧЕРТЕЖА, ВЛИЯНИЕ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРЕНИЙ И ФОРМЫ ОБВОДОВ КОРПУСА НА СВОЙСТВА КОРАБЛЯ

##### 9.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЧЕРТЕЖ, ГЛАВНЫЕ РАЗМЕРЕНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТЫ ФОРМЫ КОРПУСА

Теоретический чертёж изображает теоретическую поверхность корпуса корабля. На теоретическом чертеже изображается поверхность корабля без наружной обшивки, за исключением деревянных судов — у них поверхность корпуса проходит по наружной обшивке.

Теоретический чертёж предназначается для:

- изображения формы корабля;
- выполнения различных расчетов по теории корабля;
- изготовления модели корабля для испытаний в опытовом бассейне;
- построения планового теоретического чертежа, по которому строится корабль (с появлением и развитием систем автоматизированного проектирования и автоматизированного раскроя металла эта функция почти утрачена).

Каждый корабль представляет собой удлиненное тело, имеющее вертикально-продольную плоскость симметрии, называемую диаметральной плоскостью (ДП).

Пересечение поверхности корпуса корабля диаметральной плоскостью образует четыре линии:

- линию киля;
- линию форштевня;

- линию актерштевня;
- линию верхней палубы (или линию палубы полубака).

Плоскости, проведенные параллельно диаметральной плоскости, называются плоскостями батоксов. Пересечение этих плоскостей с поверхностью корабля образует линии, называемые батоками.

Горизонтальная плоскость, перпендикулярная к диаметральной плоскости и касательная к линии киля, называется основной плоскостью (ОП).

Плоскости, проведенные параллельно основной плоскости, называются плоскостями ватерлиний. Пересечения этих плоскостей с поверхностью корабля образуют линии, называемые ватерлиниями теоретического чертежа.

Плоскости, перпендикулярные к основной и диаметральной, называются плоскостями шпангоутов. Пересечение поверхности корпуса с этими плоскостями образуют линии, называемые шпангоутами теоретического чертежа.

Количество батоков, ватерлиний и шпангоутов зависит от потребной точности расчетов. Наиболее распространенными масштабами теоретического чертежа являются 1:100; 1:50; 1:25, и выбираются в зависимости от размеров корабля.

Обычно число ватерлиний равно  $9 + 11$ , включая основную плоскость и конструктивную ватерлинию. Ватерлиния, совпадающая с поверхностью спокойной воды при плавании корабля по проектной осадке, называется конструктивной ватерлинией (КВЛ). Обычно за КВЛ принимается ватерлиния, соответствующая нормальному водоизмещению корабля. Выше КВЛ наносятся еще 2 + 3 ватерлинии, верхняя палуба и полубак. Нумеруются ватерлинии снизу вверх.

Число батоков равно  $4 + 6$ . Они нумеруются от диаметральной плоскости к борту.

Число шпангоутов обычно принимается  $10 + 20$ . При этом за модель-шпангоут принимается 10-й и нумерация идет с носа к корму. Теоретический чертёж корабля выполняется в трех взаимно перпендикулярных проекциях, именуемых корпусом боком и полувидометой.

Корпус — совокупность проекций теоретических шпангоутов, ватерлиний и батоксов на поперечную плоскость, проходящую через средний шпангоут (мицель).

На корпусе в истинном виде изображаются проекции шпангоутов. Проекция же батоксов и ватерлиний изображаются в виде прямых линий. Ввиду симметрии шпангоутов на корпусе вычерчиваются только их половины. При этом проекции носовых шпангоутов располагаются справа от следа ДП, а проекции кормовых шпангоутов — слева. Мицель-шпангоут изображается на корпусе полностью, т. е. и на правой и на левой стороне.

Бок — совокупность проекций батоксов, шпангоутов и ватерлиний на диаметрально плоскость. В истинном виде на бок изображаются проекции батоксов.

Полуширота — совокупность проекций ватерлиний, батоксов и шпангоутов на основную плоскость.

На полушироте в истинном виде вычерчиваются проекции ватерлиний. Так как ватерлинии симметричны относительно следа ДП, они вычерчиваются не полностью, а наполовину, как правило, с одной стороны следа диаметральной плоскости.

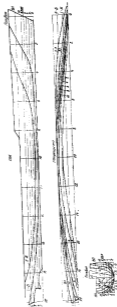
При проектировании корабля к составлению теоретического чертежа приступают после того, как определены главные размеры и основные безразмерные коэффициенты, характеризующие особенности формы корпуса корабля.

К главным размерам относятся.

1. Длина ( $L$ ) по конструктивной ватерлинии или длина между перпендикулярами — расстояние между носовым и кормовым перпендикулярами. Носовым и кормовым перпендикулярами называются перпендикуляры к основной плоскости, опущенные из точек пересечения КВЛ с линиями шпантей.

2. Длина наибольшая ( $L_{max}$ ) — расстояние между перпендикулярами к основной плоскости, опущенными из крайних точек линий шпантей.

3. Ширина по КВЛ ( $B$ ) — расстояние между касательными к конструктивной ватерлинии, проведенными параллельно следу ДП.



Теоретический чертеж корпуса корабля

4. Ширина наибольшая ( $B_{\text{max}}$ ) — расстояние между плоскостями, касательными к поверхности корпуса корабля и параллельными ДП.

5. Осадка корабля ( $T$ ) — расстояние от КВЛ до основной плоскости.

6. Высота борта на мидель-шпангоуте ( $H$ ) — расстояние от точки пересечения мидель-шпангоута с верхней палубой до основной плоскости.

#### *Коэффициенты теоретического чертежа*

Коэффициентами теоретического чертежа называются величины, характеризующие те или иные особенности формы корабельной поверхности.

Из основных коэффициентов теоретического чертежа, характеризующих особенности формы подводного объема корабля, можно указать следующие.

1. Коэффициент общей полноты водоизмещения  $\delta$  — отношение подводного объема по КВЛ к объему параллелепипеда, построенного на главных размерах корабля:

$$\delta = \frac{V}{LBT}, \quad (9.1)$$

2. Коэффициент полноты площади мидель-шпангоута  $\beta$  — отношение площади мидель-шпангоута ( $a$ ), погруженного по КВЛ, к площади прямоугольника, построенного на ширине мидель-шпангоута по КВЛ и осадке:

$$\beta = \frac{a}{BT}, \quad (9.2)$$

3. Коэффициент полноты площади ватерлинии  $\alpha$  — отношение площади КВЛ к площади описанного около нее прямоугольника:

$$\alpha = \frac{N}{BL}, \quad (9.3)$$

4. Коэффициент предельной полноты  $\varphi$  — отношение подводного объема к объему цилиндра, высотой, равной длине по

КВЛ и основанием, равным площади мидель-шпангоута по КВЛ:

$$\varphi = \frac{V}{aL} = \frac{\delta}{\beta}. \quad (9.4)$$

5. Коэффициент вертикальной полноты  $\psi$  — отношение подводного объема к объему цилиндра высотой, равной осадке, и основанием, равным площади КВЛ:

$$\psi = \frac{V}{ST} = \frac{\delta}{\alpha}. \quad (9.5)$$

Перечисленные коэффициенты теоретического чертежа связаны между собой следующими соотношениями:

$$\delta = \alpha\psi; \quad (9.6)$$

$$\delta = \beta\varphi. \quad (9.7)$$

Кроме этих коэффициентов часто используется соотношение размеров:

а) относительное удлинение  $\lambda$  — отношение длины к ширине:

$$\lambda = \frac{L}{B}; \quad (9.8)$$

б) относительная ширина  $\tau$  — отношение ширины к осадке:

$$\tau = \frac{B}{T}; \quad (9.9)$$

в) относительная высота борта  $\gamma$  — отношение высоты борта к осадке:

$$\gamma = \frac{H}{T}. \quad (9.10)$$

#### *Приближенные формулы для определения элементов формы корпуса корабля*

Рассмотрим формулы, относящиеся к определению формы корпуса корабля и получившие применение в проектных конструктивных бюро.

1. Коэффициент общей полноты водоизмещения  $\delta$ .

Для ориентировочного выбора величины  $\delta$  можно воспользоваться следующими эмпирическими выражениями. Для относительной скорости  $Fv = v/\sqrt{gL} = 0,19 + 0,30$ :

$$\delta = 0,32/Fv^{0,5} \quad (9.11)$$

В том же диапазоне относительных скоростей может быть использована более простая формула Тельфера:

$$\delta_{\text{н}} = (1,0 + 1,44)Fv \quad (9.12)$$

где  $\delta_{\text{н}}$  — коэффициент общей полноты, соответствующий околоритическим относительным скоростям, при которых сопротивление резко возрастает.

Формула Александра

$$\delta = (1,08 + 1,68)Fv \quad (Fv = [0,3 + 0,35]) \quad (9.13)$$

даст значения  $\delta$ , примерно соответствующие критическим относительным скоростям.

Для среднескоростных и быстроходных судов (кораблей) с относительными скоростями от 0,3 до 0,6 хорошие результаты дает таблица Эйра

Таблица 9.1

$Fv$	0,300	0,350	0,375	0,400	0,500	0,600
$\delta$	0,575	0,560	0,545	0,533	0,516	0,500

Если аппроксимировать данные табл.9.1, то

$$\delta = (0,62 - 0,8)Fv \quad (9.14)$$

Точность (9.14) вполне удовлетворяет требованиям исследовательского проектирования.

Для военных кораблей значения  $\delta$  находятся в следующих пределах:

- тяжелые корабли 0,5 + 0,7;
- крейсера 0,45 + 0,53;
- эсминцы 0,42 + 0,52.

2. Коэффициент полноты площади ватерлинии — для тяжелых кораблей

$$\alpha = 0,578 + 0,36; \quad (9.15)$$

— для крейсеров

$$\alpha = 0,308 + 0,5; \quad (9.16)$$

— для эсминцев

$$\alpha = 0,558 + 0,45; \quad (9.17)$$

Вполне удовлетворительные значения дает формула Е. М. Братга:

$$\alpha = 1,2 - 0,332 \frac{v}{\sqrt{L}} \quad (9.18)$$

3. Коэффициент полноты мидель-шпангоута:

$$\beta = 1,12 \frac{\delta}{\alpha} + 0,03; \quad (9.19)$$

$$\beta = 1,16 \frac{\delta}{\alpha} \quad (9.20)$$

Формула Е. М. Братга:

$$\beta = \frac{\delta}{0,08 + 0,92\delta} \quad (9.21)$$

Формула Л. М. Ногина:

$$\beta = 3,08(1,0 - 1,44Fv)Fv^{0,5} \quad (9.22)$$

при  $Fv = [0,24 - 0,30]$ .

4. Коэффициент продольной полноты  $\varphi = 5/\beta$ .

Формула Л. М. Ногина:

$$\varphi = 1,015 - 1,46Fv \quad (Fv \leq 0,24); \quad (9.23)$$

$$\varphi = 0,325/Fv^{0,5} \quad (Fv = [0,24 - 0,30]); \quad (9.24)$$

4. Центр величины  $L$ , метacentрический радиус  $r$  и моменты инерции ватерлинии  $J_x, J_y$ .

Формулы Власова:

$$\left. \begin{aligned} z_0 &= T(0.372 + 0.168\alpha/5); \\ I_x &= LB^3(0.0902\alpha - 0.02); \\ I_y &= L^3B(0.1070\alpha - 0.0378); \end{aligned} \right\} \quad (9.25)$$

Формулы Нормана:

$$\left. \begin{aligned} I_x &= (0.008 + 0.0745\alpha^2) LB^3; \\ I_y &= (0.008 + 0.0745\alpha^2) L^3 B; \end{aligned} \right\} \quad (9.26)$$

при этом  $r = I_x/V$ ;  $R = I_y/V$ .

Прежде чем приступить к построению теоретического чертежа, необходимо предварительно определить главные размеры, их соотношения и коэффициенты, характеризующие форму обводов корпуса корабля.

Анализ соотношений коэффициентов формы позволяет.

1. Установить влияние коэффициентов формы отдельно на такие свойства корабля как ходкость, остойчивость, непотопляемость, вместимость и т. п.

2. Выбрать оптимальные коэффициенты при решении частных задач.

3. Установить степень важности коэффициентов формы с точки зрения их влияния на основные качества проектируемого корабля.

#### 9.1. СПОСОБЫ ПОСТРОЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ЧЕРТЕЖА

До предпоследнего столетия кораблестроение не знало сколько-нибудь научно обоснованного способа проектирования формы корпуса корабля.

Для трехсотлетней морской кораблей времен гребного и парусного флота форма их подводной части не имела большого значения и поэтому кораблестроители того времени не уделяли особенного внимания вопросам отыскания обводов малого сопротивления.

Изобретение и применение на кораблях паровой машины, позволившее достигать больших скоростей, заставило кораблестроителей обратить внимание на вопросы сопротивления воды и на улучшение подводной части корпуса корабля. Для кора-

бальных конструкций стали использовать различные металлы, что позволило придавать кораблям обводы любой остроты и обтекаемости.

Результаты, полученные от введения более совершенных обводов, послужили стимулом для изучения сопротивления воды движению кораблей. А достижения теоретического и экспериментального изучения законов движения кораблей в воде, в свою очередь, заставили кораблестроителей создавать способы получения корпусных обводов, обеспечивающих кораблям заданные качества и свойства. Таким образом, в кораблестроении появилась построение теоретического чертежа.

Построение теоретического чертежа (ТЧ) включает в себя два этапа:

- 1) составление ТЧ — то есть получение тем или иным способом ординат теоретического чертежа, удовлетворяющего заданию;
- 2) начертывание ТЧ — графическое изображение по готовым ординатам.

До внедрения в кораблестроение систем автоматизированного проектирования применялись преимущественно графические методы с использованием имеющихся теоретических чертежей, качества которых проверены на опыте.

Известны по крайней мере четыре способа составления теоретических чертежей.

1. Способ составления ТЧ с помощью линий, выраженных аналитически.
2. Способ комплексного составления теоретического чертежа.
3. Способ составления ТЧ с помощью стреловой по шаблону-там.
4. Способ составления ТЧ путем изменения прототипа.

Наиболее удобным является способ, в котором используются аналитические выражения для корабельных обводов, так как при этом все элементы теоретического чертежа вычисляются аналитическим путем и точно. Входящие в аналитические выражения параметры и коэффициенты определяются из аналитиче-

ских выражений для задаваемых параметров и линий теоретического чертежа:

- модель-шпангоут;
- конструктивная ватерлиния;
- форштевень и актерштевень;
- строевой по шпангоутам;
- строевой по ватерлиниям.

Первый, наиболее доступный путь, предполагает использование для корабельных обводов геометрических параболических линий. Так как форма параболы не отвечает более острому корабельным обводам, имеющим кроме того точки перегиба, позже были изысканы другие, в большей степени соответствующие судам обводы, аналитические линии — производные от параболы — прогрессивки.

Стремление максимально точно аналитически изобразить линии корабельных обводов заставляло находить новые возможные виды математических выражений, не останавливаясь перед их значительным усложнением.

Были неоднократные попытки изобразить вообще всю поверхность корабля общим аналитическим выражением

$$F(x, y, z) = 0 \quad \text{или} \quad y = f(x, z), \quad (9.27)$$

то есть задавая  $x$  и  $z$ , получать ординату  $y$  любой точки поверхности.

Однако форма корпуса корабля настолько сложна, что написание для ее изображения общего аналитического выражения в настоящее время не удается.

**Способы составления теоретического чертежа с помощью линий, выражаемых аналитически**

Как было сказано, впервые для описания корабельных обводов была использована парабола вида:

$$z = a + by^2, \quad (9.28)$$

Неизвестные коэффициенты и степень уравнения определяются из граничных условий:

- 1) при  $y = 0$        $z = 0$ ;

- 2) при  $y = B/2$      $z = T$ ;

- 3)  $\omega = BTP = 2 \int_0^{B/2} ydy$ .

Используя граничные условия, обвод шпангоута выразим уравнением

$$z = T \left( \frac{2y}{B} \right)^{2\beta-1}, \quad (9.29)$$

где  $\beta$  — коэффициент полноты модель-шпангоута, принимаемый при выпуклых обводах меньше 0,5 и при выпуклых — более 0,5, но меньше 1,0.

Уравнение параболической ватерлинии может быть представлено в виде

$$y = a' + b'x^2, \quad (9.30)$$

Неизвестные коэффициенты и зависимость степени могут быть определены из граничных условий:

- 1) при  $x = 0$        $y = B/2$ ;

- 2) при  $x = L/2$      $y = 0$ ;

- 3)  $S = LB\alpha = 2 \int_{-L/2}^{L/2} ydy$ .

Используя граничные условия, обвод ватерлинии выразим уравнением

$$y = \frac{B}{2} \left[ 1 - \left( \frac{2x}{L} \right)^{2\alpha-1} \right], \quad (9.31)$$

где  $\alpha$  — коэффициент полноты ватерлинии.

При значительном отличии обводов носовой и кормовой частей ватерлинии целесообразно выражать уравнением парабол отдельно. В этом случае уравнения носовой и кормовой частей ватерлинии выражаются зависимостями:

$$y = \frac{B}{2} \left[ 1 - \left( \frac{2x}{L} \right)^{2\alpha_1-1} \right]; \quad (9.32)$$



$$y = \frac{\beta}{2} \left[ 1 - \left( \frac{2x}{L} \right)^{2n_1 + 2n_2} \right], \quad (9.33)$$

$\alpha_n$  и  $\alpha_n$  — коэффициенты полнот носовой и кормовой половины ватерлинии:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_n &= \frac{(1,010\alpha - 0,007)L + 2,3x_c}{L} \\ \alpha_n &= \frac{(0,990\alpha - 0,007)L + 2,3x_c}{L} \end{aligned} \right\} \quad (9.34)$$

где  $x_c$  — абсцисса центра тяжести площади ватерлинии.

Уравнение параболической стрелой по шпангоутам может быть представлено в виде

$$y = a'x + b''x^2, \quad (9.35)$$

Неизвестные коэффициенты и степень могут быть найдены из граничных условий:

- 1) при  $x = 0$   $y = \alpha L/2$ ;
- 2) при  $x = L/2$   $y = 0$ ;
- 3)  $S = \delta LBT = \int_{-L/2}^{L/2} y dx$ .

Используя граничные условия, стрелую по шпангоутам можно выразить уравнением

$$y = \frac{\alpha}{2} \left[ 1 - \left( \frac{2x}{L} \right)^{2n_1 + 2n_2} \right], \quad (9.36)$$

где  $\alpha$  — площадь мидель-шпангоута;  $\varphi$  — коэффициент полноты площади стрелой по шпангоутам.

Уравнение носовой и кормовой частей стрелой по шпангоутам, аналогично предыдущему, может быть представлено в виде:

$$y = \frac{\alpha}{2} \left[ 1 - \left( \frac{2x}{L} \right)^{2n_1 + 2n_2} \right], \quad (9.37)$$

$$y = \frac{\alpha}{2} \left[ 1 - \left( \frac{2x}{L} \right)^{2n_1 + 2n_2} \right], \quad (9.38)$$

$\varphi_n$  и  $\varphi_n$  — коэффициенты носовой и кормовой стрелой по шпангоутам, которые определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_n &= \frac{(1,010\varphi - 0,007)L + 2,3x_c}{L} \\ \varphi_n &= \frac{(0,990\varphi - 0,007)L + 2,3x_c}{L} \end{aligned} \right\} \quad (9.39)$$

Для аналитического выражения ватерлиний Тойбор применил параболу, уравнение которой имеет вид

$$y = 1 - ax' - cx'^2, \quad (9.40)$$

где  $a, c, m, n$  — произвольные параметры.

Уравнение (9.40) удовлетворяет граничным условиям:

- 1) при  $x = 0$   $y = 1$ ;
- 2) при  $x = 0$   $dy/dx = 0$ .

Оно должно также удовлетворять условиям:

- 1) при  $x = 1$   $y = 0$ ;
- 2)  $\int_0^1 y dx = \alpha$ .

Таким образом, уравнение (9.40), имея четыре произвольных параметра, определяет обводы корабля с двумя степенями свободы. Задаваясь углом заострения кривой, можно выразить три произвольных параметра через четвертый параметр и заданную величину. Это позволяет конструктору выбирать один параметр по своему усмотрению.

Еще в середине XVIII в. французский кораблестроитель Дюамель де Монко применил для построения корабельных линий так называемую прогрессивку, которую он получил геометрическим путем. Прогрессивка является более гибкой и ближе подходящей к корабельным обводам кривой, чем парабола, и выражается следующими уравнениями:

- а) для шпангоутов:

$$\frac{y}{\frac{B}{2}} = \frac{\left(1 - \frac{x}{l}\right)^m}{1 + m\left(\frac{x}{l}\right)^n}; \quad (9.41)$$

б) для ватерлиний:

$$\frac{y}{\frac{B}{2}} = \frac{\left(1 - \frac{x}{l}\right)^m}{1 + n\left(\frac{x}{l}\right)^m}; \quad (9.42)$$

где  $m = \frac{1-n}{n}$ , а  $n$  — экспонента.

Задаваясь величинами  $n$  и  $m$ , можно получить различные кривые.

Исследованиями свойств прогрессии и возможностей ее использования для составления теоретического чертежа занимались А. А. Попов, С. П. Дюшен, И. Г. Бубнов и другие.

Ряд других конструкторов и инженеров предлагали иные виды уравнений кривых для построения теоретических чертежей. Так, известный своими работами в области ходкости В. И. Афанасьев предложил применять кривые, названные им пластическими:

$$y = (n^x - mn^{xy} \lg n)^2, \quad (9.43)$$

$n$  и  $m$  — относительные ординаты в абсциссе какой-либо точки кривой;  $n$  и  $m$  — произвольные числа.

Известны и другие аналитические формулы:

1. Кривые преобразования линии В. И. Афанасова:

$$y = \frac{y_{\max}}{\sqrt{1 + y_{\max}^2 \lg^2 \theta / a^2}}; \quad (9.44)$$

2. Комбинированная кривая Тейлора:

$$y = y_{\max} \left[ 1 - a \left( \frac{x}{l_a} \right)^m + c \left( \frac{x}{l_c} \right)^n \right]; \quad (9.45)$$

3. Кривые Вайблума (применение ординат двух парабол):

$$y = y_{\max} \left[ 1 - a \left( \frac{x}{l_a} \right)^m \right] \left[ 1 - c \left( \frac{x}{l_c} \right)^n \right]; \quad (9.46)$$

Следует отметить, что линии, задаваемые сравнительно простыми уравнениями, мало или совсем не подходят для корабельных обводов, а сложные зависимости значительно затрудняют работу с ними и сводят на нет преимущества аналитики. Это является крупным и практически непреодолимым недостатком аналитических способов.

#### *Способ составления теоретического чертежа путем изменения прототипа*

В настоящее время накоплено такое большое количество теоретических чертежей, по которым были построены корабли, что при проектировании любого нового корабля можно найти один или даже несколько чертежей, которые своими элементами более или менее близко подходят к разрабатываемому проекту. Тогда, для получения теоретического чертежа проекта достаточно внести в близкий прототип лишь некоторые изменения.

Все способы изменения теоретического чертежа прототипа разбиваются на два вида: аналитические и графические.

#### *Аналитические способы изменения теоретического чертежа прототипа*

а) Изменение формы кривых и коэффициентов формы.

Пусть ординаты  $y$  какой-либо линии в зависимости от абсциссы определяются уравнением

$$\frac{y}{b} = f\left(\frac{x}{l}\right); \quad (9.47)$$

Если же вместо  $xl$  подставить  $(x\beta)$ , то получится другая гладкая линия, имеющая те же ординаты, но на новых абсциссах.

При  $\lambda > 1$  будут получаться более острые кривые, а при  $\lambda < 1$  — более тупые.

Число возводит в степень  $\lambda$  сами ординаты, оставаясь абсциссы без изменения. Этот второй прием удобнее практически, так как ординаты остаются на своих местах и расстояния между ними остаются постоянными.

б) Изменение теоретического чертежа при сохранении коэффициентов формы.

Если удается подобрать такой прототип, у которого обводы вполне отвечают требованиям задания, то теоретический чертеж такого прототипа можно использовать для проектируемого корабля.

Такой корабль будет не вполне подобным прототипу, так как три его размера могут иметь разные масштабные коэффициенты. Но тем не менее все элементы теоретического чертежа можно получить из расчетов прототипа, используя теорию подобия. Таким образом, мы имеем дело с трансформированным подобием (часто его называют также афинным).

#### *Графические способы составления теоретического чертежа*

Способы, которые будут рассмотрены ниже, в отличие от предыдущих, дают возможность построения не отдельных обводов, а комплекса судовых обводов теоретического чертежа. В этих способах изображение всех обводов подчинено общей зависимости, общему приему построения, поэтому их еще называют комплексными.

#### *Способ струйного образования судовых обводов*

Данный способ построения теоретического чертежа был предложен И. П. Алямовым. В этом способе, основанном на принципе сплошности струйных линий, предполагается, что движущаяся жидкость состоит из бесчисленного множества струй, причем при всех изменениях профиля канала, по которому она течет, число струй остается постоянным, а изменяется лишь их поперечное сечение.

Исходными данными в этом способе являются формы конструктивной ватерлинии и мидель-шпангоута.

Предложено И. П. Алямовым струйное образование при всей простоте оформления и вычислений кривых теоретического чертежа все же не получило распространения, так как полученные обводы значительно отличались от общепринятых, особенно в кормовой оконечности. Работа, затрачиваемая на изменения и на последующие согласование проекций настолько велика, что все преимущества данного способа терзает свое значение.

#### *Лучевой способ*

Полученные всеми приведенными выше способами ординаты теоретического чертежа требуют обязательного согласования между собой трех проекций. Работа эта весьма кропотливая и требует большого опыта конструктора, причем часто заданные мидель обводы оказываются в той или иной мере измененными.

Г. Е. Павленко, заданная целью упростить эту часть графического оформления, предложил весьма интересный и оригинальный лучевой способ.

Суть его в том, что вместо привычного применяется криволинейное проектирование корабельной поверхности, позволяющееся следующим образом.

а) Одна из осей проекций с обыкновенного теоретического чертежа должна при криволинейном проектировании остаться прямой. За такую ось Г. Е. Павленко выбрал вертикальную ватерлинию.

б) Обе другие группы проекций — ватерлинии и шпангоуты — должны проектироваться на одну общую плоскость (плоскость миделя) в виде прямых линий.

в) Ординаты по ширине должны проектироваться в свою натуральную величину.

Благодаря поставленным условиям весь теоретический чертеж сводится к одной проекции с прямыми линиями по заданным обводам конструктивной ватерлинии, мидель-шпангоута и балано-шпангоута (балано-шпангоут — шпангоут, расположенный на 1/6 длины от оконечности).

Преимущества лучевого способа заключаются в простоте составления теоретического чертежа, где на одном чертеже имеются одновременно все три вида сечений, изображенных привычно

линиями, что гарантирует плавность и согласованность этого чертежа. Также значительно упрощается запись ординат для фиксирования вычерченных обводов (так, при 20 шпангоутах, 5 ватерлиниях и 3 бабках число ординат достигает 180, а при дугеобразном изображении — 35). Недостатком этого способа является то, что его наличие не избавляет от необходимости вычерчивания в дополнении к нему обыкновенного чертежа. Кроме того, способ не позволяет получить поверхность точно по заданию, и необходимо вносить изменения в образования конечностей, то есть дорабатывать теоретический чертёж.

#### Составление теоретического чертежа с помощью стропов по шпангоутам

Известно, что теоретический чертёж должен удовлетворять двум следующим условиям:

— водоизмещение корабля должно быть равно его весу;

— центр величины должен лежать на одной вертикали с центром тяжести.

И вес, и положение центра тяжести корабля определяются в самом начале проектирования.

Для выполнения этих условий необходимо построить такую строповую по шпангоутам, площадь которой представляла бы требуемое водоизмещение, а центр тяжести ее площади по длине соответствовал бы положению центра тяжести корабля. Очень часто для построения строповой применяется парабола, имеющая требуемые площадь и положение центра тяжести.

Обыкновенно ползуются стропами существующих прототипов, внося в них изменения для удовлетворения задания.

Не останавливаясь на целом ряде способов построения стропов по шпангоутам, отметим только, что порядок составления теоретического чертежа этими способами предусматривает два основных этапа.

1. По заданным размерам и коэффициенту полноты строится конструктивная ватерлиния.

2. Для вычерчивания шпангоутов определяются их площади со строповой по шпангоутам, полуширина с конструктивной ватерлинии и осадка.

Разделив площадь шпангоута на его ширину и осадку, можно получить коэффициент полноты. По этим данным вычерчивается любой шпангоут и, следовательно, весь теоретический чертёж.

#### Графические способы изменения теоретического чертежа прототипа

На практике большей частью не удается подобрать прототип, который можно пересчитать по законам теории подобия, и приходится в чертёж прототипа вносить более или менее значительные изменения:

- изменять коэффициент полноты;
- переносить центр величины;
- делать местное увеличение ширины обводов.

Чаще всего эти изменения выполняются методом пропорциональных линий, имеющим несколько способов. Рассмотрим два наиболее часто встречающихся.

а) Способ пропорционального деления.

Способ применяется при необходимости изменения коэффициента общей полноты —  $\delta$ , которое можно достигнуть путем изменения коэффициента полноты модель-шпангоута —  $\beta$  (рис. 9.1).

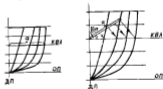


Рис. 9.1

1. Вычерчивается сетка корпуса проектируемого корабля в том же масштабе и с тем же числом ватерлиний, что и прототип.

2. На сетке вычерчивается модель-шпангоут требуемой полноты и формы.

3. Из точек пересечения ватерлиний с диаметральной плоскостью под некоторыми углами проводится прямая.

4. На эту прямую переносится точка пересечения шпангоута с ватерлинией.

5. Крайние точки соединяются прямой.

6. Точки остальных шпангоутов получают параллельным переносом.

Необходимо заметить, что ординаты каждой ватерлинии получаются пропорциональными по отношению наибольшей ширины соответствующих ватерлиний проектируемого корабля и протогипа, а не отношению ширины корабля, как это имеет место в случае подобия теоретического чертежа.

б) Способ пропорциональных линий.

Данный способ рассмотрим на примере изменения модель-шпангоута.

1. На корпусе протогипа строится модель-шпангоут проектируемого корабля.

2. Из точек пересечения ватерлиний с модель-шпангоутом проектируемого корабля восстанавливаются перпендикуляры до пересечения с модель-шпангоутом протогипа.

3. Полученные точки соединяются прямыми линиями с диаметральной плоскостью.

4. На точки пересечения этих прямых со шпангоутом опускаются перпендикуляры на ближайшие ватерлинии. В результате получаются точки соответствующих шпангоутов проектируемого корабля.

В тех случаях, когда изменение обводов производится не на всей длине корабля, а только на его части, наклонные прямые линии проводятся не к диаметральной плоскости, а к тому шпангоуту, от которого производится изменение. Для более плавного перехода от неизменяемой части к изменяемой наклонную прямую делают близкой к ней плавной кривой, касательной к ватерлинии в диаметральной плоскости.

#### *Порядок вычерчивания теоретического чертежа*

По теоретическому чертежу производится многочисленные расчеты и прежде всего расчеты по теории корабля. Требования

к точности вычисления определяемых величин устанавливают как необходимый масштаб теоретического чертежа, так и количество ватерлиний до конструктивной включительно.

Количество ватерлиний и шпангоутов определяется, кроме того, точностью способа, который предполагается для нахождения той или иной величины. Например, для определения по правилу тригонометрии водонепроницаемости поперечной не более 0,3% необходимо не менее 14 ватерлиний и 21 шпангоута.

Следует иметь в виду, что масштаб теоретического чертежа должен быть удобным для пользования при пересчете ординат. Обычно определяют следующий масштаб теоретического чертежа:

- крупным военным кораблям 1:100;
- средним и малым военным кораблям 1:50; 1:10.

Вычерчивание теоретического чертежа производится в следующем порядке.

1. Пробивается след диаметральной плоскости на полушироту и откладывается длина корабля по конструктивной ватерлинии. Затем путем геометрического построения восстанавливается носовой и кормовой перпендикуляры.

2. На перпендикулярах, начиная от следа диаметральной плоскости, последовательно откладываются:

- полуширота корабля;
- расстояние между полуширотой и боком;
- осадка корабля;
- высота корпуса от следа основной.

По полученным точкам пробивается:

- габаритная линия полушироты;
- след основной плоскости на боку;
- след плоскости конструктивной ватерлинии;
- габаритная линия высоты корпуса.

3. Длина корабля по следу диаметральной плоскости на полушироту и по горизонтальной линии, соответствующей высоте корпуса на боку, разбивается на равные промежутки — шпанги. Число промежутков берется равным числу шпангоутов, что соответствует двадцати одному теоретическому шпангоуту. Крайний носовой и крайний кормовой промежутки часто делятся пополам. Через

полученные точки в пределах бока и полушироты проводятся теоретические шпангоуты.

4. На продолжении основной линии бока перпендикулярно ей пробивается след диаметральной плоскости, в обе стороны от которого она выдвигается полуширота корабля и проводится габаритная линия корпуса.

5. Полуширота корабля по перпендикулярам к диаметральной плоскости на полушироте и по основной линии на корпусе делится на три-пять равных промежутков и через полученные точки на обеих проекциях пробиваются батоксы.

6. Осадка корабля на проецирах бок и корпус разбивается на одинаковые промежутки и пробиваются ватерлинии. Выше КВЛ ватерлинии, как правило, проводятся через условные расстояния.

Совокупность всех указанных выше построений образует сетку теоретического чертежа.

7. Проверяется параллельность и перпендикулярность линий сетки на всех проекциях. Проверка проводится путем сравнения длин диагоналей прямоугольников, образованных линиями сетки.

8. На боку наносится контур корабля в диаметральной плоскости форштевнем вправо.

9. Вычерчиваются линии шпангоутов на проекции корпуса. После этого по ординатам, связанным с корпусом, вычерчиваются проекции ватерлиний на полушироте.

Точки прищипания проекций шпангоутов на корпус и ватерлиний на полушироте к следу диаметральной плоскости должны находиться в проекционной связи с линиями форштевня и актерштевня на боку.

10. Используя проекции корпуса и полушироты, вычерчивают линии батоксов на боку.

#### *Особые линии теоретического чертежа*

К особым линиям теоретического чертежа относятся бортовая линия, палубные линии и линия погиба палубы.

Бортовой линией является линия пересечения поверхности борта корпуса корабля с поверхностью верхней палубы.

Линии, полученные пересечением поверхности борта прямоугольными (средней, нижней) палубами, называются палубными линиями.

Бортовая (и палубная) линия представляет собой линию двоякой кривизны; и поэтому на лобку на проекции теоретического чертежа проектируется в виде кривой линии.

Линия погиба палубы. Верхняя палуба (палуба подубака) кроме продольной погиба имеет и поперечную. Величина этой погиба для различных кораблей имеет свои значения. Для военных кораблей в среднем можно принять стрелку погиба равной 1/100В. Формула линии погиба — квадратичная парабола или дуга большого радиуса.

#### **13. ВЛИЯНИЕ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРЕНИЙ И ФОРМЫ ОБЪЕДОВ КОРПУСА НА СВОЙСТВА КОРАБЛЯ**

Почти век назад в своей статье о боевых качествах военных кораблей адмирал С. О. Макаров уделил много внимания рассмотрению о боевых и морских качествах военных кораблей. Он писал: "Боевая сила кораблей складывается из: морской качества, наступательных средств и оборонительных средств". Такая классификация не утратила своего значения и по сей день.

В настоящее время выделяют три группы свойств, определяющих боееспособность корабля:

- эксплуатационные свойства, характеризующие корабль как плавучее сооружение;
- ударные свойства;
- боевая устойчивость (защитные свойства).

Ударные свойства задаются в тактико-техническом задании и, как правило, в дальнейшем не меняются. Боевая устойчивость задается в основном так же, за исключением живучести, защищенности по физическим полям и конструктивной защиты. Эксплуатационные свойства корабля создаются в основном в процессе проектирования.

### *Влияние главных размеров и формы обводов корпуса на сопротивляемость движению корабля*

Сопротивление воды представляет собой горизонтальную составляющую главного вектора гидродинамических сил, действующих на корпус корабля, и направленную в сторону, противоположную его поступательному движению.

В соответствии с характером гидродинамических сил, возникающих на каждом элементе смоченной поверхности корпуса, силу сопротивления воды принято разделять на две составляющие: сопротивление трения и сопротивление давления. Первая из них зависит главным образом от величины смоченной поверхности, вторая — от формы корпуса.

Поскольку сопротивление давления наиболее чувствительно к изменению формы корабля, его снижение и подлиннее выбор безразмерных характеристик и формы обводов корпуса.

Рассмотрим сначала влияние на сопротивляемость корабля некоторых коэффициентов теоретического чертежа, а затем выясним влияние продольных и поперечных очертаний корпуса.

#### *Влияние коэффициента полноты водонемещения $\delta$*

При постоянных значениях водоизмещения и скорости хода коэффициент полноты водонемещения выгодно уменьшать, так как при этом сопротивление воды, а следовательно, и мощность механизмов уменьшаются. Предел уменьшению  $\delta$  ставит требования внутреннего размещения помещений на корабле и увеличение веса корпуса, связанное с увеличением главных размеров.

#### *Влияние коэффициента продольной полноты $\varphi$*

Коэффициент продольной полноты  $\varphi = \delta/\beta$ , часто называемый призматическим коэффициентом, характеризует распределение водонемещения по длине корабля. Иначе говоря, изменение коэффициента  $\varphi$  влияет на форму стоевой по шпангоутам. Действительно, увеличение  $\varphi$  при фиксированном значении  $\delta$  влечет за собой притупление оконечностей корабля и, наоборот, с уменьшением  $\varphi$  водонемещение концентрируется у миделя, при этом происходит заострение оконечностей.

Коэффициент  $\varphi$  оказывает весьма существенное влияние на сопротивление кораблей всех типов. Это объясняется тем, что с изменением  $\varphi$  связано изменение той части сопротивления давления, которая обусловлена действием корабельных волн. Так как зона наибольших волновых давлений, охватывающая носовую оконечность корабля, зависит от относительной скорости  $Fr = v/\sqrt{g\lambda}$ , то влияние  $\varphi$  при различных скоростях проявляется неодинаково.

При умеренных скоростях  $Fr = 0,25 - 0,35$  зона повышенных волновых давлений простирается до 3—6-го теоретического шпангоута, поэтому для получения наименьшего волнового сопротивления носовую оконечность следует заострить, сосредоточивая водонемещение у миделя. В этом случае оптимальное значение коэффициента продольной полноты  $\varphi$  составляет величину порядка 0,55 + 0,60.

При больших относительных скоростях  $Fr \geq 0,45$  волновые давления распространяются почти по всей длине корпуса, следовательно, подводный объем целесообразно распределить более равномерно по длине корабля. Для этих режимов движения наилучшие с точки зрения сопротивляемости, результаты дают значения  $\varphi$  порядка 0,63 + 0,65.

Следует иметь в виду, что на практике величина коэффициента  $\varphi$  часто принимается не с точки зрения ходкости. В частности, для крупных военных кораблей с относительными скоростями  $Fr = 0,25 + 0,35$  сделать острые оконечности не представляется возможным по условиям размещения подводной конструктивной защиты.

#### *Влияние относительной длины корпуса $l$*

Коэффициент остроты корпуса  $l = L/\sqrt{D}$  характеризует степень удлинения корабля (относительная длина). Удлинение корабля, определяемое значением коэффициента  $l$ , оказывает очень сильное влияние на величину носового сопротивления, играющего доминирующую роль при больших относительных скоростях.

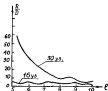


Рис. 9.1

при  $v = 30$  уз, при которой переход от  $l = 6$  к  $l = 9$  сопровождается снижением сопротивления давления более чем в 5 раз.

На практике иногда приходится отступать от относительных значений  $l$  из-за возрастающей массы корпуса, ухудшения поворотливости и др.

#### Влияние коэффициента $\tau = VT$

Отношение  $VT$  не оказывает сильного влияния на сопротивление корпуса, но существенно сказывается на его поперечной устойчивости. При  $L = const$  увеличение  $VT$  ведет к увеличению смоченной поверхности и, следовательно, к увеличению сопротивления трения. При этом сопротивление давления также несколько увеличивается.

Для быстроходных кораблей увеличение  $VT$  за счет увеличения осадки и уменьшения ширины оказывает благоприятное влияние на сопротивление.

#### Влияние формы корпуса

Решающее влияние на сопротивление оказывает форма продольной очертания, определяемая формой ватерлиний и баттоков. Как показывают исследования, при  $F_r \leq 0,3$  область наибольших волновых давлений распространяется примерно до 5-го теоретического шпангоута. В этом случае целесообразно применять 5-образные ватерлинии. При  $F_r = 0,4$  граница осевой зоны волновых давлений смещается к 7—8 шпангоутам. В этом случае применение 5-образных ватерлиний уже нецелесообразно.

Предпочтительнее прямоугольные ватерлинии в носовой части. Начиная с  $F_r \geq 0,4$  существенное влияние начинает оказывать форма кормовых обводов. Величина волнового сопротивления в этом случае на 70—80 % обусловлена разрывом в корме. Следует при этом стремиться получить более пологие кормовые баттоки.

С целью уменьшения волнообразования в носовой оконечности иногда применяют бульбовую форму носа. Основное назначение бульбы — образование волны, которая, нагнавшись на гребень первой носовой волны, уменьшает общее волнообразование. Бульб следует по возможности заглублять ниже конструктивной ватерлинии. При  $F_r = 0,3$  установка бульбы в сочетании с 5-образными ватерлиниями может привести к снижению сопротивления корпуса до 5 %. При  $F_r > 0,4$  установка бульбы нецелесообразна.

Вопрос о выборе формы носовых обводов приобретает большое значение для быстроходных легких кораблей в связи с необходимостью обеспечения их удовлетворительной мореходности.

Рассмотрим влияние носовых обводов на заливчивость и забрызганность.

Можно показать, что корабль, идущий вразрез волне, совершенно не будет заливаться, если высота надводного борта в носу  $H_{н.н.} \geq 0,12L$ , в корме  $H_{к.к.}$  и на миделе  $H_{м.м.} \geq 0,05L$ . Конечно, эти требования невыполнимы.

Чтобы уменьшить зарывание кораблей в волну, необходимо иметь достаточно пологие обводы носовых шпангоутов. В то же время кормовые шпангоуты не должны быть пологими, чтобы корма не всплывала и тем самым не увеличивала зарывчивость в волну носа.

Придание носовым шпангоутам сильного развала не обеспечивает исключения брызгообразования, так как она увеличивается за счет высоких местных вертикальных скоростей. Для уменьшения забрызганности иногда применяют "слом" линии борта.



*Учет влияния соотношений коэффициентов и главных размеров на скорость корабля*

Используя известные соотношения ходкости и выполнив некоторые эквивалентные преобразования так, чтобы связать скорость движения корабля с мощностью главной энергетической установки и параметрами формы корпуса, можно получить следующее выражение:

$$v_s = \sqrt{\frac{HP^2 \eta_1}{0,0925(\varphi \beta + \alpha) K_{\text{вп}} \rho g L^3}} \quad (9.48)$$

Анализируя зависимости изменения относительной скорости от различных составляющих (9.48) для некоторых кораблей можно видеть, что наиболее важным является влияние изменения  $\varphi$ ,  $l$ ,  $\beta$ .

Увеличение коэффициента продольной полноты  $\varphi$  приводит к резкому падению скорости (увеличение коэффициента продольной полноты соответствует увеличению  $\delta$  — коэффициента обшей полноты, так как  $\varphi = \delta/\beta$ , а  $\beta$  входит в формулу и по условию остается постоянным). Уменьшение  $\varphi$  первоначально приводит к повышению скорости на 3,6%, а затем к ее снижению.

Уменьшение относительной длины корабля  $l$  ведет к резкому падению скорости, а увеличение — к росту скорости до некоторого значения, к которому падению, а затем опять к росту.

Уменьшение коэффициента полноты мидель-шпангоута  $\beta$  при неизменном коэффициенте  $\delta$  приводит к резкому падению скорости.

Уменьшение относительной осадки корабля  $l$  увеличивает скорость. При ее увеличении, наоборот, скорость хотя и медленно, но падает.

Аналогичное, но в менее резкой форме, влияние оказывает изменение водоизмещения и отношение ширины корабля к его осадке  $\epsilon = B/T$ .

*Влияние соотношений главных размеров и коэффициентов на общую прочность корабля*

Из курса строительной механики корабля известно, что между требованиями к продольной прочности и жесткости корпуса корабля существует известное противоречие, заключающееся в том, что достаточно прочный корабль, имеющий большую стрелку прогиба, не удовлетворяет требованиям жесткости и набора.

Можно привести выражение, полученное на основе требований к прочности, жесткости и статистической обработке материалов по легким крейсерам и связывающее главные элементы корабля  $H$ ,  $L$ ,  $\delta$ ,  $B$ ,  $T$  с характеристиками его прочности:

$$\alpha = \frac{0,32 H^2 (\delta B T)^{0,5} L}{H^{0,5} (\alpha K_{\text{вп}} \xi \sigma_c)^{0,5} - 7(\delta B T)^{0,5} L} \quad (9.49)$$

где:  $\alpha$  — суммарная площадь сечения продольных связей на мидель-шпангоуте;  $\xi \sigma_c$  — допускаемые напряжения  $\xi$  для волновых кораблей ( $\approx 0,4$ );  $\alpha = H/y$  — отстояние верхней фибры эквивалентного бруса от нейтральной оси ( $\alpha \approx 2,06$ );  $K_{\text{вп}} = DL/M_{\text{вп}}$  — коэффициент, вычисляемый для полноты и вершины волны

	$K_{\text{вп}}$	$K_{\text{вп}}$
легкие крейсера	30—50	22—28
эскадренных миноносцы	20—30	23—37

Влияние главных элементов корабля на общую прочность может быть иллюстрировано графиком (рис 9.3), созданным применительно к легким крейсерам.

Из графика следует:

1) Увеличение длины —  $L$ , ширины —  $B$ , осадки —  $T$  и коэффициента обшей полноты —  $\delta$  ведет к необходимости увеличения величины площади сечения продольных связей в мидельном сечении  $\alpha$ . Наибольшее влияние имеет увеличение длины.

И наоборот, если существует необходимость уменьшения площади сечений продольных связей в модельном сечении, то наиболее эффективно — уменьшение длины.

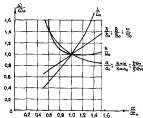


Рис. 9.3

2) Как следует из графика, на корабле не совсем удачно, с точки зрения прочности, выбрана высота борта. Увеличение высоты борта на 35% позволяет существенно снизить площадь поперечных сечений продольных связей.

3) Увеличение допускаемых напряжений позволяет снизить требуемую площадь поперечного сечения продольных связей. Аналогичное влияние имеет и увеличение коэффициентов  $K_{\text{дв}}$  и  $\alpha$ . Увеличение последнего может быть достигнуто либо увеличением ( $H$ ), либо снижением ( $y$ ) отстояния верхней фибры эквивалентного бруса от нейтральной оси, то есть поднятием нейтральной оси.

#### Влияние главных размеров и формы обводов корпуса на остойчивость и вместимость

При анализе влияния соотношения главных размеров и коэффициентов спроектированного корабля одним из основных моментов был и остается учет остойчивости, традиционно зна-

чимым параметром которой считается поперечная метацентрическая высота, вычисляемая по формуле:

$$h = z_0 + r - z_x \quad (9.50)$$

Ставаемые уравнения начальной остойчивости  $z_0$ ,  $r$ ,  $z_x$  представляют собой функциональные зависимости от главных размеров корабля.

Известно, что положение метацентра определяется величиной метацентрического радиуса  $\rho$  и ординатой центра тяжести  $z$ , для которых можно принять следующие выражения:

$$z = K_1 \sqrt{\frac{\alpha}{\delta}} T; \quad (9.51)$$

$$\rho = K_2 \frac{\alpha^2 B^2}{\delta T}, \quad (9.52)$$

где  $K_1 = 0,5$ ;

$$K_2 = \frac{1}{11,5 + 11,6} \quad (\text{криволинейная корма}); \quad (9.53)$$

$$K_2 = \frac{1}{11,7} \quad (\text{трапециевидная корма}). \quad (9.54)$$

Следовательно, положение метацентра может быть представлено в виде функции:

$$z_m = f(\alpha, \delta, B, T), \quad (9.55)$$

полный дифференциал которой равен:

$$dz_m = \frac{\partial f}{\partial \alpha} d\alpha + \frac{\partial f}{\partial \delta} d\delta + \frac{\partial f}{\partial B} dB + \frac{\partial f}{\partial T} dT \quad (9.56)$$

так как

$$z_m = z + \rho, \quad (9.57)$$

то

$$dz_m = dz + d\rho, \quad (9.58)$$

где

$$dz = \frac{1}{2} z_c \frac{d\alpha}{\alpha} - \frac{1}{2} z_c \frac{d\delta}{\delta} + z_c \frac{dT}{T}; \quad (9.59)$$

$$d\rho = 2\rho \frac{d\alpha}{\alpha} - \rho \frac{d\delta}{\delta} - \rho \frac{dT}{T} + 2\rho \frac{dB}{B}. \quad (9.60)$$

Объединив одноименные члены окончательно, получим:

$$dz_m = \left(\frac{z_c}{2} + 2\rho\right) \frac{d\alpha}{\alpha} - \left(\frac{z_c}{2} + \rho\right) \frac{d\delta}{\delta} + (z_c - \rho) \frac{dT}{T} + 2\rho \frac{dB}{B}. \quad (9.61)$$

Рассмотрим частные случаи:

1.  $d\alpha = d\delta = dT = 0$ . Отсюда следует, что

$$dz_m = 2\rho \frac{dB}{B} \quad \text{или} \quad \frac{dz_m}{dB} = 2\rho \frac{1}{B}. \quad (9.62)$$

Подставляя в (9.62) выражение для  $\rho$  из формулы (9.52), получим:

$$\frac{dz_m}{dB} = 2K_2 \frac{\alpha^2 B}{\delta T}. \quad (9.63)$$

Класс корабля	$\alpha$	$\delta$	$B/T$	$dz_m/dB$
Тяжелые корабли	0,73	0,615	3,5	0,527
Эсминцы	0,70	0,480	3,15	0,550

Из приведенной таблицы можно видеть, что для эсминцев каждый метр увеличения ширины корабля приводит к возвышению метacentра на 0,55 м.

2.  $d\alpha = d\delta = dT = 0$ .

Тогда

$$dz_m = (z_c - \rho) \frac{dT}{T} \quad (9.64)$$

или

$$\frac{dz_m}{dT} = (z_c - \rho) \frac{1}{T}. \quad (9.65)$$

При малых  $T/B$  величина  $(z_c - \rho) < 0$ . Следовательно, если корабль имеет большое значение отношения  $T/B$  (коммерческие суда), то перегрузка не сильно влияет на остойчивость, если  $T/B$

мало (военные корабли), то перегрузка всегда ведет к уменьшению остойчивости.

3.  $d\delta = dT = dB = 0$ .

Тогда

$$dz_m = \left(\frac{z_c}{2} + 2\rho\right) \frac{d\alpha}{\alpha}. \quad (9.66)$$

Из выражения (9.66) видно, что увеличение  $\alpha$  во всех случаях увеличивает остойчивость, причем значительно, чем увеличение  $B$ .

4.  $d\alpha = dT = dB = 0$ .

Тогда

$$dz_m = -\left(\frac{z_c}{2} + 2\rho\right) \frac{d\delta}{\delta}. \quad (9.67)$$

Из выражения (9.67) видно, что увеличение  $\delta$  уменьшает  $z$  и  $\rho$ , следовательно, остойчивость.

Вопросы, связанные с бортовой качкой, возникают перед проектировщиком в двойном аспекте: с точки зрения решающего запаса остойчивости корабля, плавающего на взволнованном море, и с точки зрения его эксплуатационных качеств.

Влияние качки корабля на безопасность плавания заключается в том, что порывистая бортовая качка, совершающаяся с большой амплитудой, может повлечь корабль в тяжелое положение вследствие попадания воды во внутренние отсеки через палубные отверстия, перемещение грузов, нарушения прочности конструкций.

При проектировании корабля приходится учитывать бортовую качку не только как фактор, снижающий безопасность плавания, но и как фактор влияющий на эффективность корабля.

В качестве примера, иллюстрирующего связь показателей остойчивости и качки корабля с его эксплуатационными качествами, можно отметить, что выбор метacentрической высоты в значительной мере подчиняется требованиям обитасмости. Мировая практика установила пределы метacentрической высоты, при которых качка воспринимается экипажем как удовлетворительная и которые в то же время не противоречат требова-

нием безопасности плавания корабля в испорченном состоянии и в аварийных условиях.

С точки зрения функционирования оружия и вооружения верхней предел начальной остойчивости определяется требованиями, предъявляемыми к амплитудам, угловым скоростям и угловым ускорениям качки. Для эффективного использования оружия необходимо, чтобы эти величины не были чрезмерно большими.

Изложенные выше соображения о бортовой качке могут быть частично распространены на килевую и вертикальную качку.

Действительно, продольные колебания корабля, подобно поперечным колебаниям, значительно ухудшают условия эксплуатации корабля, особенно если они сопровождаются заливанием верхней палубы. На некоторых кораблях при продольной качке наблюдаются сильные удары воды о корпус корабля, которые могут привести к местным нарушениям прочности корпуса. Продольные колебания снижают скорость корабля в свежую погоду, что также ухудшает его эффективность.

Килевая качка, вызывающая большие дивергентные ускорения в районах корабля, удаленных от его центра тяжести, может столь же тяжело сказываться на самочувствии экипажа, как и бортовая качка.

Период собственных колебаний корабля при бортовой качке выражается формулой

$$\tau = 2\pi \sqrt{\frac{I}{\Delta b}} = 2\pi \frac{r}{\sqrt{gh}} \quad (9.68)$$

где  $I = I_0 + \Delta l$  — момент инерции массы корабля относительно продольной оси, проходящей через центр тяжести, вычисленный с учетом присоединенной массы воды;  $\Delta$  — водоизмещение;  $r$  — соответствующий  $I$  радиус инерции;  $h$  — поперечная метацентрическая высота.

Поскольку численно  $g \approx \pi$ , период собственных поперечных колебаний может быть подсчитан по формуле:

$$\tau = \frac{2r}{\sqrt{gh}} \quad (9.69)$$

в которой вследствие произведенных сокращений размерность обеих частей различна.

Для приближенной оценки величины  $2r$  были предложены следующие формулы:

$$\left. \begin{aligned} 2r &= k_1 B \sqrt{1 + \frac{H^2}{B^2}}; \\ 2r &= k_2 B \sqrt{1 + 4 \frac{z_g^2}{H^2}}; \\ 2r &= kB. \end{aligned} \right\} \quad (9.70)$$

где  $k_1$ ,  $k_2$ , и  $k$  — практические коэффициенты;  $z_g$  — отстояние центра тяжести корабля от основной плоскости.

Коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$  более стабильны, чем коэффициент  $k$ , однако вследствие простоты последней из формул (9.70), она широко используется для приближенной оценки периода  $\tau$ .

Коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$  для военных кораблей и гражданских судов имеют приблизительно такие численные значения:

$$k_1 = 0,6 - 0,7;$$

$$k_2 = 0,58.$$

Значение коэффициента  $k$  для военных кораблей не выходит обычно из следующих пределов:

$$k = 0,75 - 0,85.$$

Поскольку радиус инерции массы корабля сравнительно быстро возрастает с увеличением его дивергентных размеров, на малых кораблях, даже при умеренных значениях поперечной метацентрической высоты, период собственных поперечных колебаний меньше, чем на больших кораблях. Некоторое представление о характерных случаях дают следующие ориентировочные значения периодов собственных поперечных колебаний  $\tau$  различных кораблей (в сек):

Тяжелые корабли	- 14 - 18.
Крейсеры	- 12 - 14.
Эскадренные миноносцы	- 8 - 9.
Сторожевые корабли, тральщики	- 4 - 8.

Естественно, что отступления от средних значений  $\tau$  могут быть довольно значительными.

*Влияние главных размеров и формы обводов на вместимость корпуса корабля*

Учет вместимости корабля при проектировании в настоящее время чрезвычайно важен. Приемы актуальности этого вопроса были изложены в гл. 7.1 настоящего учебника.

Вспомогательная одна из формул для определения объема корпуса:

$$V_c = V \left[ 1 + \frac{\alpha}{\delta} (\beta - 1) \right], \quad (9.71)$$

где  $V$  - объем подводной части корпуса корабля.

Значение  $V$  на  $\delta LVT$  при условии  $\gamma = 1$ , выраженное (9.71) примет вид, удобный для легкой анализа влияния изменения  $L$ ,  $B$ ,  $T$ ,  $\delta$ ,  $\alpha$  и  $\tau = \beta T$  на вместимость корабля  $V_c$ :

$$V_c = LBT[\delta + \alpha(\beta - 1)], \quad (9.72)$$

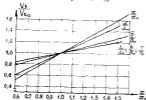


Рис. 9.4

По данной формуле произведены расчеты влияния изменения  $L$ ,  $B$ ,  $T$ ,  $\delta$ ,  $\alpha$  и  $\tau$  на вместимость корабля при изменении каково-либо одной величины, при всех остальных, принятых неизменными. По результатам расчетов построен график (рис. 9.4). На основании рассмотренного графика можно сказать, что наибольшее влияние оказывает изменение отношения высоты борта к осадке  $\delta$ , меньшее —  $\alpha$ , еще меньшее —  $\beta$  и самое незначительное —  $L$ ,  $B$  и  $T$ .

## Глава 10. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ ОБЩЕГО РАСПОЛОЖЕНИЯ И ФОРМИРОВАНИЕ АРХИТЕКТУРНО-КОМПОНОВОЧНЫХ РЕШЕНИЙ

### 10.1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ПРИЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЧЕРТЕЖЕЙ ОБЩЕГО РАСПОЛОЖЕНИЯ

Чертежами общего расположения, входящими в состав проекта корабля, называются чертежи, отражающие основной замысел на формирование архитектурного облика корабля и показывающие место размещения по длине, ширине и высоте корабля оружия, вооружения и технических средств, систем управления ими (и кораблем в целом), служебных, жилых и бытовых помещений, различных корабельных запасов и помещений, обеспечивающих возможность перемещения по кораблю личного состава и грузов, транспортировку рабочих сред и энергоносителей, передачу информации.

К чертежам общего расположения относятся: продольный разрез по диаметральной плоскости, горизонтальные сечения (палубы, платформы, трюм, площадки, мостики), поперечные сечения, вид сверху, с носа, с кормы, боковой вид и силуэт корабля.

Продольный разрез является сечением корабля по диаметральной плоскости. На нем вычерчиваются почти все внутренние помещения и он является единственным продольно-вертикальным сечением в чертежах общего расположения.

Горизонтальные сечения — это сечения корабля на высоте 0,5 - 1,0 м от плоскости настилов палуб, платформ и трюма. По-

Переносные сечения выполняются в таких местах по длине корабля, где располагаются помещения, для которых необходимо проверить реальность размещения оружия, вооружения, технических средств и других объектов. Сечения также выполняются для особых участков корпуса корабля также, как район расположения гребных винтов, место примыкания обтекателя ГАС к корпусу корабля и некоторых других. Для согласования размещения оборудования в рассматриваемом сечении с оборудованием, расположенным в нос и в корму от него, сечение выполняется "смотря в нос" или "смотря в корму". На это сечение наносится все, что попадает в поле зрения за плоскостью чертежа в нос или корму соответственно.

Вид сверху представляет собой чертеж общего расположения оружия, вооружения, мостиков, рубок, шлюзов, корабельных устройств и других видимых предметов, расположенных на верхней палубе, полубака и т. д. Аналогично строится вид корабля с боку.

Разработка чертежей общего расположения является самостоятельным этапом проектирования корабля. Так же, как и весь процесс проектирования, этот этап осуществляется методом последовательных приближений. Сначала разрабатываются самые общие схемы размещения наиболее крупного и ответственного оборудования, затем выполняется их уточнение и детализация в зависимости от того, на какой стадии находится разработка проекта корабля. Качество выполнения чертежей общего расположения в значительной мере зависит от искусства, опыта и практических навыков разработчика. Сложность успешного выполнения этой работы прежде всего обуславливается необходимостью постоянного согласования всех чертежей общего расположения между собой и учета целого ряда требований, предъявляемых к размещению того или иного помещения, а также тех условий, которые возникают в результате их взаимного расположения.

Чертежи общего расположения являются наиболее традиционным инструментом проектирования и выполняются в процессе разработки проекта уже в течение нескольких веков. За это время состав и содержание чертежей не претерпели существенных

изменений. В то же время, по мере увеличения насыщенности корабля оружием, вооружением и техническими средствами, ростом числа требований как к условиям размещения судового оборудования, так и к обустройству корабельных помещений, сложность составления чертежей общего расположения постоянно возрастала. Сегодня эта задача представляет самостоятельную научно-техническую проблему, требующую для своего решения новых инструментальных средств и теоретических подходов. Проектно-конструкторские бюро постоянно совершенствуют методы и приемы разработки чертежей общего расположения, однако ведущая роль в решении этой задачи все же остается за организациями Военно-Морского Флота.

Нередко аппарату Главного наблюдателя за проектом приходится сталкиваться с тем, что разработка чертежей нового проекта не содержит общего замысла, отвечающего заданию на проектирование корабля, и современным тенденциям военного кораблестроения, а является не более, чем выраженным лично опытом конструктора — разработчика чертежей, а порой и просто трансформированной копией старого проекта. При этом, в новое проектирование переносятся ошибки прошлых лет и не учитываются изменения в подходах к разработке чертежей, связанные со спецификой задания на новый проект. Так, например, если корабль, принятый при разработке чертежей общего расположения за прототип, имел значительно большую полезную нагрузку по сравнению с новым проектом, то вся концепция общего расположения будущего корабля должна быть перенацелена на выполнение в большей степени требований к обитаемости, ремонтнопригодности и живучести, чем это удалось сделать на прототипе. Другим примером может служить отечественный опыт проектирования авианосных кораблей. Разработка чертежей их общего расположения велась в значительной степени с использованием опыта проектирования крупных надводных кораблей основных классов. При этом остались без внимания как проектанты, так и Военно-Морского Флота такие особенности авианосных кораблей, как сложные и значительно большие деформации корпусных конструкций, работающих в условиях больших раскрытий палуб, увеличенное количество личи-

го состава, что требовало выработки принципиально новой концепции условий их обитания и организации дежурно-вахтенной службы, претворения в организационных мероприятиях, выполняемых по боевой готовности корабля и при обеспечении полетов на корабле, и многое другое.

Для того, чтобы исключить подобные просчеты, необходимо обеспечить развитие теоретических средств и практических приемов разработки чертежей общего расположения темпами, соответствующими росту проблем, возникающих в связи с успешными этапами проектирования. Принимая во внимание всю сложность поставленной задачи и ее традиционность для проектирования, можно уверенно предположить, что наиболее развитыми и пригодными для практического применения идеями окажутся методологические и методические аспекты теории.

Так же, как и в других разделах теории проектирования при создании чертежей общего расположения за основу берется методология системного подхода. Ее реализация осуществляется на основе морфологического и функционального описания задач анализа и синтеза.

Морфологическое описание предусматривает создание системы категорирования помещений корабля (объектовый подход) и систематизацию требований к этим помещениям и отношениям, возникающим между ними (системный подход). В соответствии со сложившейся практикой проектирования, накопленным опытом и действующими руководящими документами (прежде всего, требованиями ВМФ к проектированию кораблей) все помещения корабля разделяются на следующие категории.

По функциональному предназначению: служебные, жилые, коммуникационные (для транспортировки людей, грузов, электрикабелей, трубо- и вакопроводов, смешанные), хранения запасов (запасных частей) и неспециализованные (запасные).

По режимам использования:

— боевого применения: посты управления (кораблем, оружием, вооружением, энергетической установкой), командные посты (боевых частей и служб), боевые посты (подразделений боевых частей, аварийных партий);

— повседневного применения: стрелковой, продовольственной, медицинской, дежурной служб и т. п.

По присутствию личного состава: обитаемые, которые, в свою очередь, подразделяются на помещения для постоянного размещения личного состава и общего пользования, и необитаемые.

По пожаро- и взрывобезопасности (в том числе, служебные необитаемые: погреба боезапаса, топливные цистерны) по специальной классификации.

По обитаемости: жилые, общественные, продовольственные, медицинские, санитарно-бытовые.

Возможно применение и других категорий.

В зависимости от той или иной категории помещения, к нему предъявляются соответствующие требования:

— по размещению оборудования и его защищенности от действия воды, пара, химических веществ, температуры, открытого огня и т. п.;

— по параметрам среды обитания;

— по оборудованию средствами связи, контроля и жизнеобеспечения;

— по расположению помещений в корпусе корабля, и т. п.

Кроме того, ко всем помещениям предъявляются требования по обеспечению удобства обитания личного состава и эксплуатации технических средств, ремонтпригодности размещаемого в них оборудования, расположению входов (сходов) и выходов, окон и иллюминаторов.

Помимо требований к помещениям, при отработке чертежей общего расположения особое внимание должно быть обращено на выполнение условий оптимальности, устанавливаемых между корабельными помещениями, и требований к их интенсивности. Эти условия возникают как следствие требований к свойствам корабля. Так, из требований по взрывопожаробезопасности вытекает условие разнесения по кораблю наиболее взрывопожароопасных помещений (погребов боезапаса, хранилищ легкого топлива и др.), т. е. между этими помещениями устанавливаются отношения удаленности друг от друга. Однако, существует и противоположное условие, но уже из соображений более эффек-

тивной защиты взрывопожароопасных помещений. Это условие предопределяет отношение компактности размещения тех же помещений. Разрешением этой ситуации должен быть некоторый компромисс, в определенной степени удовлетворяющий обоим противоположным требованиям. Если иметь в виду, что на корабле, как правило, рассматриваются не пары, а множественные отношения, то легко понять, насколько сложной является задача общего расположения в целом.

Наиболее сложной задачей разработки чертежей общего расположения является задача синтеза компоновки помещений корабля. Помимо сложности учета отношений, о которой только лишь говорилось, при решении задачи синтеза следует также иметь в виду необходимость учета интенсивности этих отношений. Здесь по сути дела речь идет о наложении на внешние между помещениями отношения некоторой качественной шкалы предпочтения. Например, когда устанавливается отношение типа приближения или удаления помещений, могут дополнительно вводиться такие понятия, как "очень близко", "не очень близко", "далеко" и т. п., используемые в качестве дополнительной информации при выработке компромиссных решений. Дополнительную сложность в рассматриваемую задачу вносит также фактор времени: одни отношения действуют непрерывно в течение всего периода функционирования корабля, другие — только в определенные отрезки времени с некоторой частотностью.

Однако и это расширение задачи еще не в полной мере отражает все ее аспекты. Одним из основных в методологии системного подхода является одновременное представление системы и как совокупности составивших ее элементов, и как целостного явления. Применительно к задаче общего расположения упомянутое системное свойство ведет к необходимости полного обращения к общим схемам решения по кораблю. Первым раз в самом начале работы, когда производится разбивка корпуса на водонепроницаемые отсеки, расстановка основных несущих конструкций (элементов конструктивной защиты), определение зон размещения машинных отделений и основного крупногабаритного оружия и вооружения. Затем эта процедура повторяется каждый раз после очередного этапа компоновки

помещений, когда возникает необходимость целостного оценивания формируемого чертежа. В этот этап, помимо собственно процедуры оценивания промежуточного результата работы, должна входить также задача формирования архитектурных решений и внешнего облика корабля. При этом, между решениями внутренней компоновки и архитектурными решениями также будет возникать устойчивое противоречие, хорошо известное в строительной архитектуре.

Описанная задача синтеза общего расположения не обеспечена сегодня какими-либо строгими теоретическими средствами. Определенные подходы к ее решению с помощью интеллектуальных машинных процедур в рамках системы автоматизированного проектирования будут изложены в последующей параграфах настоящей главы. Эти подходы еще только завоевывают себе право на жизнь в практике проектирования, основными же пока остаются опыт и интуиция.

Для проверки на соответствие требованиям ВМФ, или хотя бы сравнения между собой альтернативных вариантов компоновки чертежей общего расположения служит задача анализа. Анализ чертежей общего расположения предусматривает определенную методическую последовательность выполнения работы. На первом ее этапе необходимо выполнить обобщение известных схем общего расположения кораблей проектируемого класса и их архитектурных типов на основе отечественных и зарубежных аналогов. Затем формулируются приоритеты требований к проекту, исходя из общего замысла (концепции) его создания. Так, для многоцелевого корабля среднего класса с известными ограничениями по водоизмещению, обеспечивающим необходимый темп его строительства, на первом месте должна стоять требования сбалансированности всех его основных свойств и, прежде всего, боевых возможностей, живучести, эксплуатационной пригодности и обитаемости. Затем, очевидно, должны удовлетворяться требования, отражающие "рамочность" всех основных функциональных комплексов по условиям их размещения на корабле. Если же концепция корабля предполагает акцентировку того или иного типа оружия, то соответственно этому будет распределяться и приоритеты. В зависимо-



ти от заданной автономности корабля различное место должны занимать требования к помещению хранения запасов и возможностям их пополнения. Для кораблей с высокими значениями коэффициента оперативного напряжения и ограниченными условиями по обеспечению в предлагаемых пунктах базирования приоритетным станет приспособленность корабля к функционированию в этих условиях, и так далее.

Следующим этапом анализа является последовательная проверка выполнения выдвинутых требований в порядке, задаваемом их приоритетами. Переход от требований к свойствам корабля к требованиям к общему расположению достаточно сложен и предполагает высокую квалификацию исполнителя. На этом этапе прежде всего необходимо вычлнить, какие из требований к свойствам корабля могут быть однозначно истолкованы как требования к отдельным помещениям, а какие требуют совместного рассмотрения групп помещений и отношений между ними. Например, в требованиях к обитаемости и безопасности личного состава прямо указываются на такие требования к помещениям, как обеспечение их входами и выходами, высота помещений в свету, допустимые площади жилых помещений и т. п. Не на много сложнее трактовать также такие требования к размещению электрооборудования, как указание на смежность помещений, в которых расположены генераторные агрегаты, с помещениями, где размещены главные распределительные щиты и местные пульты управления электроустановками. Однако проверка, например, требований по пополнению корабля боепасом, провизией или топливом, уже потребует проведения определенных расчетов с использованием в том числе и чертежей общего расположения. При этом, сначала с помощью чертежей необходимо выполнить маршрутизацию путей загрузки корабля, а затем рассчитать по полученным данным потребное время и трудоемкость выполнения погрузо-разгрузочных работ. В другом случае, когда возникает необходимость проверки такого свойства, как ремонтпригодность, на чертежах общего расположения с помощью габаритных макетов проверяется удобство демонтажа и возможности выгрузки (загрузки) наиболее габаритного оборудования, после чего также производится расчеты потребной трудоемкости и временных затрат.

Предлагаем прием разделения анализа чертежей общего расположения на анализ требований к собственно помещению и к совокупности помещений в контексте складывающейся архитектурно-компоновочной ситуации, здесь не иссякает в виду, что с помощью оценки выполнения требований только к самим помещениям можно ответить на вопрос об удовлетворительном уровне того или иного свойства корабля в целом. Для любого свойства, в том числе и для обитаемости, и безопасности, применимы относительно которых только что приводились, существует необходимость как в частном анализе выполнения требований применительно к отдельным помещениям корабля, так и в целостной оценке чертежей.

Особую сложность при анализе общего расположения составляет определение достаточности выполнения тех или иных рекомендаций к размещению помещений. Выполнить все эти рекомендации в полной мере обычно не удастся, поэтому принципиальное значение здесь приобретает взвешенность подхода.

В рамках третьего этапа также последовательно выполняется еще одна обязательная для чертежей общего расположения работа. Это согласование входов и выходов, других коммуникационных устройств, обеспечивающих пространственную связь помещений. Согласование должно проводиться на всех проекциях корабля одновременно, что делает эту работу трудоемкой и требующей большого внимания. Вместе с тем, сами условия согласования чертежей общего расположения достаточно просты и не требуют принятия каких-либо дополнительных проектных решений, поэтому иметь, эта процедура скорее всего могла бы подтвердиться автоматизации.

По результатам последовательного анализа, выполненного на предыдущем этапе, составляется перечень невыполненных требований и определяются наиболее неблагоприятные зоны общего расположения. При этом, рекомендуется проводить выборочную экспертизу представленных чертежей с помощью, если так можно выразиться, дополнительных "осечений" проекта. Суть этого приема заключается в выборе какого-либо количественно-

го проектного показателя, такого, например, как количество (относительное или абсолютное) вентиляторов, тамбуров, длина коридоров, число неиспользуемых (паразитных) помещений и т. п., с помощью которых можно получить информацию о качестве общего расположения.

В том случае, если согласиться с выделенными замечаниями и отклонениями от требований заказа, возможны два выхода. Первый из них предусматривает переконструировку в большей или меньшей степени ограниченной части чертежей общего расположения. Она может означать одну или несколько палуб в пределах одного автономного отсека или предусматривать перестановку между собой двух таких локальных областей, расположенных в разных частях корабля. Другой путь направлен на выявление и устранение порошного решения, принятого в том или ином узле компоновки и препятствующего успешному завершению работы. Этот путь реализуется только в том случае, когда чертежи не дали положительных результатов, поскольку переконструировка достаточно крупного узла общего расположения идет к значительным переделкам во всех чертежах, а иногда, и к их полной переработке.

Последним этапом анализа является общая оценка чертежей общего расположения и внешнего вида корабля в целом. При выполнении этого этапа снова привлекаются для сравнительно-анализа материалы проектов существующих кораблей, а также организуется проведение экспертиз по различным направлениям (живучести, ремонтной и эксплуатационной пригодности и т. п.). Для уточнения общего расположения в наиболее ответственных местах (модовой пост, пост энергетики и живучести и др.) создаются макеты в натуральную величину (или крупномасштабные) и проводится макетные комиссии. Немаловажное значение в описании внешнего облика корабля имеет создание демонстрационных моделей, выполняемых обычно в масштабе 1 : 100 или 1 : 200 (для наиболее крупных кораблей). С целью сокращения затрат на создание макетов и моделей, а также для обеспечения их многовариантного представления в последнее время начинают находить применение электронные макеты или

модели (кибермодели), создаваемые с использованием современных достижений в области машинной графики.

## И.2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ АРХИТЕКТУРНО-КОМПОЗИЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ

В последние годы все большее распространение получают методы и средства машинной графики. Это связано с одной стороны с высокими темпами развития вычислительных средств и их программного обеспечения, а с другой с актуальными задачами проектирования, требованиями практики. Как уже отмечалось ранее, по мере совершенствования оружия, вооружения и технических средств, устанавливаемых на корабли и суда ВМФ, увеличения их количества и номенклатуры все более значимыми становится их размещение, зависимость функционирования от места установки на корабле и окружающей конструктивной ситуации. Все перечисленные факторы уже не могут быть учтены в массовых или массово-высотимостных моделях. Эту задачу выполняет модели, учитывающие особенности принимаемых при проектировании архитектурно-композиционных решений.

Любые модели машинной графики предполагают создание геометрического образа корабля. При этом, можно было бы выделить два основных направления разработки графических моделей. Первое из них существует уже несколько десятилетий, и его успехи тесно связаны с развитием средств программного обеспечения и вычислительной техники вообще. Основными задачами, решаемыми в рамках этого направления, являются освобождение конструктора от рутинного механического труда и создание высококачественных изображений (чертежей) с помощью вычислительных средств. Модели, создаваемые в этом направлении, могут стать основой систем безбумажной информатики.

Второе направление получило развитие сравнительно недавно, и оно не в такой степени, как первое, связано с развитием вычислительных средств. Основной задачей этого направления является создание моделей, обеспечивающих интеллектуальную поддержку конструктора. Здесь речь идет прежде всего о необ-

возможности автоматизации процесса принятия архитектурно-композиционных решений, хотя для достижения этой цели потребуются и создание геометрического образа, и выполнение промежуточных расчетов, и принятие конструкторских решений более низкого уровня. Помимо целого ряда других задач, при реализации второго направления должно быть обеспечено определение главных элементов проектируемого корабля непосредственно путем графической прорисовки.

Определение главных элементов проекта графическим методом глубоко традиционно для практического проектирования. Это конструкторская прорисовка, эскизная проработка, набросок общего расположения и т. п. Принципиально эту работу можно проводить двумя способами. Одним из них является способ "натягивания" на некотором образце упаковочные размерные объекты главных размерностей корабля и определения по ним остальных главных элементов. Другой же предполагает первоначальное размещение объектов в пределах, определяемых подсчетными предварительно аналитическими путем главными размерностями. Если размещение произведено удачно, то главные размерности остаются неизменными. В противном случае существует также ряд приемов, позволяющих выработать новые, уже большие, чем аналитические, значения главных размерностей корабля. Первый способ, как правило, используется тогда, когда среди объектов размещения есть такие, геометрические характеристики которых сравнимы с соответствующими главными размерностями корабля. Иногда говорят, что в этом случае определение главных элементов корабля осуществляется "от угла", что характерно, как это уже отмечалось ранее, для систем "аппаратного" типа, например, для катеров, КДПП, подводных лодок и т. п.

Второй способ в большей степени применим к системам машинной структуры, то есть таким, в которых значения геометрических характеристик любого размещаемого объекта приблизительно малы по сравнению с соответствующими главными размерностями корабля, и таких объектов достаточно много. К такого рода системам относятся все водномеханические корабли основных классов, за исключением авианосцев и кораблей.

Независимо от избранного способа прежде, чем определить главные элементы корабля графическим путем, необходимо построить его геометрический образ. Для решения этой задачи используются так называемые "параметрические" модели. Под параметрическими геометрическими моделями мы будем понимать математические модели, устанавливающие между управляемыми параметрами входа  $\{X_p\}$ , исходными данными  $\{Q_p\}$  и геометрическими характеристиками синтезируемого объекта, достигаемыми для визуализации его облика,  $\{Y_p\}$  функциональное отношение вида

$$F_p: \{X_p\} \times \{Q_p\} \rightarrow \{Y_p\}. \quad (10.1)$$

Задача создания моделей типа (10.1) также делится на создание библиотеки моделей примитивов, представляющих собой геометрические модели объектов размещения, и создание моделей, позволяющих получать визуализацию архитектурно-композиционных решений, согласованных с изображениями примитивов. И первая, и вторая задачи не являются непосредственно задачами теории проектирования. Они зависят от типа используемой вычислительной техники и вида системного обеспечения. Поэтому здесь мы будем считать, что эта работа выполнена и ее результаты находятся в распоряжении проектианта.

Для формирования вектора  $\{X_p\}$ , являющегося исходным в параметрической геометрической модели, разрабатываются алгоритмические геометрические модели. В свою очередь, эти модели представляют собой передаточную функцию типа:

$$F_m: \{X_m\} \times \{Q_m\} \rightarrow \{Y_m\}. \quad (10.2)$$

где  $\{X_m\}$  - множество главных элементов и (или) необходимых для визуализации геометрических характеристик объектов размещения проектируемого корабля.

Алгоритмические геометрические модели также довольно четко делятся на два подкласса: модели типа "решатель", предназначенные почти исключительно для выбора тех или иных архитектурно-композиционных решений, и модели типа "вычислитель", служащие большей частью для выполнения расчетов по определению значений геометрических характеристик архитектурно-композиционных решений, принятых в "решателе".

Проложение моделей типа "решатель" и типа "вычислитель" может быть последовательным или предусматривать какое-либо возвращение алгоритмические петли, но главным здесь будет одно: построение геометрического образа корабля должно быть задачей прямого синтеза и не требовать разрешимости вложенного итерационного цикла за конечное число шагов. Это связано с тем, что в отличие от алгоритмических моделей определения главных элементов корабля, которые рассматривались в параграфах 8.1 и 8.2, число замыкающих переменных и уравнений замыкания при геометрическом моделировании резко возрастает, что ведет к неоправданно большому времени счета. С другой стороны, существенную часть задачи синтеза геометрического образа составляют процедуры принятия решения, не позволяющие получать решения с точностью большей, чем до испорченной альтернативы. Успешная отмеченные обстоятельства, а также то, что весьма желательное формирование геометрического образа выполнять во время, сравнимое с временем решения других задач определения главных элементов проекта, в моделях синтеза геометрического образа корабля почти не получается полных дедуктивных выводов, как это имело место при определении главных элементов корабля на основе решения уравнения масс или уравнений масс и жесткости. Альтернативой такому подходу может стать задача ситуационного выбора, относящаяся к классу задач искусственного интеллекта.

Настоящий учебник (см. раздел VI) не ставит своей целью изложение хотя бы основ теории ситуационного выбора, однако, для раскрытия содержания моделей формирования архитектурно-компоновочных решений необходимо все-таки сделать некоторые пояснения.

Модель и, соответственно, механизм ситуационного выбора построена на принципе последовательного предъявления так называемой ситуации (в нашем случае, конструктивной ситуации), распознавания этой ситуации, то есть установления взаимно однозначного соответствия между предъявляемой ситуацией и одной из некоторого набора готовых ситуаций, и, наконец, сопоставлении каждой из готовых ситуаций некоторого конструктивного решения. Например: если конструктивная ситуа-

ция описывается хотя бы тремя качественными параметрами: размеры объекта размещения (корабля), размеры размещаемого в нем элемента (габариты ЗУР) и количество этих элементов в объекте размещения (число ЗУР), и каждый из этих параметров может принимать одно из трех своих значений: большой, средний, малый, то уже возникает  $3^3 = 27$  готовых конструктивных ситуаций. Для того, чтобы распознать сложившуюся в какой-то момент действия модели конструктивную ситуацию, то есть ситуацию предъявления, как одну из готовых, необходимо ввести кодирование предъявляемых и готовых конструктивных ситуаций и создать механизм их декодирования. В этом же примере, если использовать трехзначный трехзначный код, такая ситуация, как "размещение в большом корабле среднего числа малых ЗУР", могла бы быть закодирована следующим образом: 1 2 3. При этом, распознавание сложившейся конструктивной ситуации осуществляется либо жестким установлением разделяющих границ числовой оси какого-либо одного количественного параметра (например, водонеточения корабля или массы ЗУР), либо с помощью нечетких представлений этих границ применительно к системе количественных параметров на основе теории нечетких множеств Заде [132]. В любом случае, после кодирования сложившейся ситуации и установления взаимно однозначного соответствия ее кода коду некоторой готовой ситуации (в нашем случае эта операция не требует дополнительных решений, но в общем случае может оказаться, что точного соответствия установить нельзя и необходимо иметь механизм поиска наиболее близкой готовой ситуации, получившей название механизма распознавания образов), остается только ответить на вопрос: откуда берутся готовые решения для готовых конструктивных ситуаций? Ответ на этот вопрос содержится в других задачах искусственного интеллекта таковы, как задачи самообучения и самоорганизации. Изложение содержания этих задач можно найти в [287].

Поскольку привлечение средств и задач искусственного интеллекта по своей сути нарушает доказательный характер проводимых рассуждений, считается допустимым весь процесс принятия решений в "решателе" представлять, как последователь-

ность сопоставляемых задач с последующей проверкой результатов на решении на сбалансированность. Суть такого подхода заключается в том, что, например, рассматриваются как самостоятельные и независимые такие задачи, как расстановка палуб и переборки в корпус корабля (одна задача), размещение объектов оружия и вооружения (другая задача) и архитектурная компоновка надстройки (третья задача).

В свою очередь, размещение объектов оружия и вооружения распадается еще на две задачи: продольное размещение (в терминах эшелонов оружия) и поперечное размещение (на условия равномерного покрытия углов обзора и обстрела), и т. п. Возможно влияние одной задачи на другую проверяется в конце прохождения каждой группы задач по критерию сбалансированности (симметрии). При этом, допускается изменение ранее принятых решений в определенных рамках, причем последние уже больше не провранты.

Более подробно рассмотрение упомянутых механизмов ситуационного выбора можно найти в соответствующей литературе. Здесь же мы рассмотрим только те модели, которые необходимо построить в рамках задачи "вычислитель" после того, как в "решателе" получено конструктивное решение в соответствии со сложившейся конструктивной ситуацией.

После завершения работы "решателя", в результате которой определен порядок размещения объектов на корабле, необходимо определить точные координаты привязки графических примитивов размещаемых объектов в системе координат корабля. Эта работа также содержит целый ряд этапов принятия решений, но уже гораздо более низкого уровня, чем в "решателе". Учитывая это обстоятельство, а также то, что при выполнении этой работы объем аналитических вычислений становится уже значительным, из рассматриваемой задачи выделяют, как бы управляемую часть, называемую "координатор", в которой организуется обращение к подпрограммам вычисления необходимых геометрических характеристик, объединяемых по объектно-принципу. Например, "подпрограмма размещения артиллерийской установки", или "подпрограмма размещения дымовых труб" и т. п.

Так же, как массовые модели и модели вместимости, геометрические модели имеют различные уровни сложности моделичного описания. Вместе с тем, в любом случае геометрические модели должны давать описание пространственных тел и допускать их проекцию на любую координатную плоскость в системе координат корабля. Так, геометрическим аналогом модели, построенной способом презентирования (см. п. 8.1), будет аффинное преобразование примитива, линейной модели станет отвечать трансформированное подобие, а более сложное моделирование будет связано с ситуационным выбором того или иного примитива из некоторого готового набора. Все перечисленные уровни сложности так же, как при рассмотрении массовых моделей и моделей вместимости, соотносятся со случаями полного, частичного подобия и отсутствия близкого прототипа. В свою очередь, сами модели визуализации примитивов могут быть реализованы либо как метод мест их установки на корабле, либо в виде канонических тел, либо, наконец, достаточно сложными геометрическими фигурами. Так, например, визуализация артиллерийской установки может быть реализована или в виде отрезков координатных осей с центром в точке привязки артиллерийской установки, или в виде системы цилиндров (радиус обметания, диаметр башни, подбашенного отделения), или наконец, в виде некоторой параметрической путем трансформированной проекции прототипа заданной степени подробности.

При моделировании геометрических образов размещаемых объектов помимо значений тех геометрических характеристик, которые будут использованы при визуализации этих объектов, необходимо выполнить моделирование самого процесса установки размещаемых объектов в соответствии с определенным в "решателе" порядком. Так, если в качестве примера вновь рассмотрим артиллерийскую установку и будем считать, что из "решателя" известно, в каком порядке по отношению к другим размещаемым объектам этого вида (оружия и вооружения) она расположена, то возникает задача ее непосредственной привязки к корпусу корабля. Чтобы решить эту задачу, необходимо принять ряд более частных решений. Эти решения, пользуясь терминологией экспертных систем, уже могут быть определены как

некоторые правила конструктивного оформления установки данного объекта в корпус. В качестве таких правил могут выступать, например, условия размещения артиллерийской установки на главной поперечной переборке, максимально допустимый угол затенения от впереди стоящего объекта, условия размещения подбавочного отделения в корпусе, разрешенная зона установки смежных объектов размещения и т. п.

Интересно отметить, что в отдельных случаях задача вычисления параметров, необходимых для визуализации объекта, и задачи его привязки оказываются органически связанными. Так, например, если предполагается размещение пусковой установки ЭРК шахтного типа, в которой в качестве ее элементов выступают транспортно-пусковые контейнеры (ТПК) с ЗУР, то при известном числе ТПК,  $N_{\text{ТПК}}$ , необходимо сформировать пакет ПУ. Для этого следует задать определенное число ТПК, расположенных в пакете по длине корабля, и их число по ширине.

$$C_{\text{ЭРК}} = \frac{N_{\text{ТПК}}}{N_{\text{корпус}}} = \frac{N_{\text{ТПК}}^2}{N_{\text{ТПК}}} \quad (10.3)$$

Возможные значения, принимаемые величиной  $C_{\text{ЭРК}}$ , могут изменяться в некоторых статистических пределах:  $C_{\text{ЭРК}} \in [C_{\text{ЭРКmin}}, C_{\text{ЭРКmax}}]$ . В то же время, при размещении пусковой установки требуется выполнять условие размещения ее в корпусе корабля:

$$B_{\text{ЭРК}} \geq N_{\text{ТПК}} h_{\text{ТПК}} \quad (10.4)$$

где  $B_{\text{ЭРК}}$  — ширина корпуса корабля в плоскости шпангоута с абсциссой  $x$  и на глубине аппроксиматы  $z$ ;  $h_{\text{ТПК}}$  — ширина короткой грани ТПК.

В том случае, если выполнение условия (10.4) не обеспечивает величину  $C_{\text{ЭРК}}$  значений в диапазоне  $[C_{\text{ЭРКmin}}, C_{\text{ЭРКmax}}]$ , должна быть изменена либо величина  $x$ , либо величина  $z$ , то есть точка привязки пусковой установки.

Существенное различие правил конструктивного оформления от конструкторских решений уровня "решетчат" заключается в том, что они являются принадлежностью устанавливаемого

объекта и слабо связаны с другими объектами, в то время, как решения, принимаемые в "решетчат", прежде всего ориентированы на создание общей компоновки, без излишней детализации каждого объекта. Несмотря на введенное разграничение, следует иметь в виду, что это деление условно и является не более, чем еще одним модельным приемом сгущения задачи с целью ее упрощения. На самом деле вопросы, возникающие при локальной установке объекта, тесно связаны с глобальной компоновкой и наоборот.

В завершение этого параграфа необходимо несколько слов сказать о геометрической модели корпуса корабля. Как правило, для принятия решения об архитектурной компоновке не требуется очень точного представления судовой поверхности. На этом этапе вполне удовлетворительной оказывается модель "параболического корпуса", о которой уже говорилось в п. 8.2. применительно к методам определения фактического объема корпуса корабля, участвующего в уравнении вместимости, и в п. 9.2.

В отличие от выражений, приведенных в п. 8.2, при геометрическом моделировании особую важность приобретают линейные размеры. Используя те же параболические представления, что и в моделях вместимости, координаты точек судовой поверхности можно получить из следующих выражений.

Ширина корабля на уровне осадки, равной  $z$ :

$$B = B \left( \frac{z}{T} \right)^{\beta+1} \quad (10.5)$$

где  $B$  — ширина корабля по КВЛ;  $T$  — осадка, а  $\beta$  — коэффициент полноты мидель-шпангоута.

С учетом граничных условий

$$\begin{aligned} B &= B_1(T), \\ B_m &= B_1(H), \\ B_1(0) &= 0, \end{aligned} \quad (10.6)$$

где  $H$  — высота борта корабля на миделе, уравнение (10.5) может быть записано в виде

$$B_x = B_{\text{из}} \left( \frac{x}{L} \right)^{\beta' - \beta'} \quad (10.7)$$

где  $\beta'$  определяется из выражения

$$\frac{\beta'}{1 - \beta'} = \frac{\log(B_x/B_{\text{из}})}{\log(x/L)} \quad (10.8)$$

Ширина корабля по верхней палубе на длине  $x$  в нос от миделя определяется выражением (при начале координат в точке пересечения КВЛ и линии ахтерштепня)

$$B_x = B_{\text{из}} \left[ 1 - \left( \frac{2x - L}{L} \right)^{\alpha_1 + \alpha_2} \right] \quad (10.9)$$

а в корму

$$B_x = B_{\text{из}} \left[ 1 - \left( \frac{L - 2x}{L} \right)^{\alpha_1 + \alpha_2} \right] \quad (10.10)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — коэффициенты полноты носовой и кормовой частей ватерлинии соответственно.

Значения этих коэффициентов обычно находят по формулам типа (9.34).

Существует также большое количество других выражений, позволяющих определить аналитическим путем любую точку суловой поверхности (см. п. 9.2).

Параболическое представление корпуса широко применяется в алгоритмических геометрических моделях, однако для построения достаточно гладкого и близкого к реальному визуального отображения оно уже не годится. На этом этапе обычно используется метод трансформированного преобразования геометрического чертежа прототипа с его визуализацией на основе осцилляции кривых кубическими сплайнами [328].

### 10.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛАВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОРАБЛЯ С УЧЕТОМ АРХИТЕКТУРНО-КОМПОЗИЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ

Построение графического образа корабля как геометрического тела формально может быть не связано ни с уравнением

данным его по массе, ни с обеспечением каких-либо других кораблестроительных свойств, кроме геометрических. Поэтому модели, рассмотренные нами в параграфах 8.1—8.3, сами по себе еще не решают задачу определения главных элементов корабля при его проектировании.

В то же время, определение главных элементов с учетом архитектурно-композиционных решений уже не является достаточно известной задачей, выходящей своей историей и определенным набором методов решения, как это было в предыдущих случаях. Действительно, моделирование графического образа корабля на той методической и технологической основе, которая была изложена в главе 8, может быть реализовано только с использованием современной вычислительной техники и специальных средств программного обеспечения. До предоставления этих возможностей проектировщик прибегает к глубокой традиционной графической (эскизной) проработке. Именно эскизная проработка обычно служит водоразделом между первым и вторым приближениями в определении главных элементов корабля. Методы, способы и приемы, используемые конструктором при выполнении эскизных проработок, во многом индивидуальны, носят эвристический характер и поэтому трудно формализуемы. Попытки использовать этот интеллектуальный задел в автоматизированном проектировании как раз связаны с привлечением в проектирование методов искусственного интеллекта, о чем уже говорилось в параграфе 10.2. Вместе с тем, с точки зрения процедуры определения главных элементов корабля, традиционная эскизная проработка не предусматривает дальнейшего согласования результатов проработки с параметрами аналитической модели (массовой или массовой-вместимостевой). Работа переносится на следующий этап проектирования, предполагающий сопоставление детальной нагрузки масс по выполненным чертежам и определение массовых элементов по разделам этой нагрузки. При этом, все расчеты носят поверочный характер.

С развитием необходимых вычислительных и программных средств появилась возможность организации обратной связи от результатов построения графического образа к решению аналитической модели определения главных элементов корабля. Од-

ной из первых реализаций такого подхода стал способ определения главных элементов корабля с учетом архитектурно-компоновочных решений, разработанный сотрудником ЦНИИ МО РФ Викторином Н. В. Суть его заключается в следующем.

Пусть в результате решения массовой или массово-вместимостной модели определены главные размеры и другие элементы проекта. Тогда, на основе полученных главных размеров может быть реализована задача формирования графического образа корабля. В результате решения этой задачи тем или иным способом может оказаться, что значений главных размеров, полученных из аналитического решения, недостаточно для реализации некоторой прилегающей компоновки. Здесь возможны различные пути решения задачи.

Во-первых, принятая компоновка не была предельно плотной, и можно попытаться ее уплотнить. В то же время при формировании архитектурно-компоновочных решений критерий плотности упаковки вряд ли можно считать удовлетворительным. В любом случае после конечного числа попыток уплотнения упаковки может выясниться, что полученные размеров все же недостаточно. Тогда можно попытаться увеличивать те главные размеры, относительно которых не выполняются условия размещения. Однако при таком подходе будут нарушаться основные соотношения главных размеров. Очевидно, что делать это только на основании размеров, без учета мореходных, деловых и других свойств корабля не следует. Наконец, логично было бы увеличить на необходимую величину значение того размера корабля, относительно которого не выполняется условие размещения, а затем путем аффинного преобразования пересчитать все остальные главные размеры, сохраняя неизменными их основные соотношения ( $\lambda = LAB$ ;  $\tau = BT$ ;  $\gamma = HT$ ). Наконец, последний подход является наиболее приемлемым, но и самым в себе определенным сложным.

Так, например, если условие размещения не удовлетворяет длина корабля, то ее можно увеличить на необходимую величину  $\Delta L$ . Тогда новая ("геометрическая") длина корабля будет определяться выражением

$$L_x = L + \Delta L, \quad (10.11)$$

Соответственно, могут быть получены выражения для других главных размеров

$$B_x = L_x/\lambda; \quad T_x = B_x/\tau; \quad H_x = T_x/\gamma, \quad (10.12)$$

а новое, геометрическое водонизещение корабля определится следующим образом

$$D_x = \delta L_x B_x T_x, \quad (10.13)$$

где  $\delta$  — коэффициент общей полноты.

С другой стороны, полученное водонизещение может оказаться неоправданно большим, так как при увеличении ширины (или высоты корпуса) корабля некоторые решения компоновки могли бы быть изменены, и увеличения длины на величину  $\Delta L$  уже не потребовалось бы.

В этом случае приращение длины могло бы быть вновь пересчитано, что повлекло бы новые изменения других главных размеров и т. д. Причина возникающего итерационного процесса заключается в том, что при решении задачи о компоновке предполагалась возможность разбиения этой задачи на ряд более простых сепарабельных задач, в то время как в соответствии с другим допущением главные размеры корабля считаются жестко связанными основными соотношениями. Это противоречие и не позволяет последовательно разрешить сложившуюся ситуацию. В качестве выхода из нее может рассматриваться итерационный цикл с шагом  $\delta L$ , равным предполагаемой точности вычислений. При этом возможные изменения могут претерпевать последовательно именно те главные размеры, относительно которых не удалось выполнить условия очередной компоновки.

После реализации одной из рассмотренных процедур вырабатывается новое, геометрическое водонизещение корабля  $D_x$ . При этом, в случае увеличения водонизещения корабля ( $D_x > D$ ) корабль получает дополнительные силы плавучести, равные разности массовой и геометрического водонизещений. Чтобы предотвратить "всплытие" корабля под действием этих сил, необходимо увеличить его массу. Эта операция проводится в два этапа.

На первом этапе в массовой (или массово-вместимостной) модели пересчитываются модельные фрагменты, определяющие



разделы масс проектируемого корабля, относительно новых главных размерений проекта

$$P_i' = P_i(L_p, B_p, T_p, H_p, D_p), \quad i \in \{J\}. \quad (10.14)$$

В результате этого пересчета массовое водоизмещение корабля возрастает, но все еще не становится равным геометрическому.

$$D_2' = \sum_i P_i'(L_p, B_p, T_p, H_p, D_p) < D_2. \quad (10.15)$$

Чтобы понять, почему неравенство (10.15) обязательно должно иметь место, обратимся к рис. 8.2. Из него видно, что равенство значений функции модели  $P(D)$  и биссектрисы координатного угла осуществляется только в одной точке — той, которой соответствует решение аналитической модели. Для всех других значений водоизмещений, больших, чем массовое, будет всегда выполняться условие (10.15). Оставшаяся после пересчета модель равна

$$\Delta_1 = D_2 - D_2' \quad (10.16)$$

будет примерно на порядок меньше, чем первоначальная разность

$$\Delta_2 = D_2 - D \quad (10.17)$$

в силу того, что отношение этих разностей близко отношению полезной нагрузки к водоизмещению корабля (см. рис. 8.2).

При этом, если, например, геометрическое водоизмещение оказалось даже на 20% больше массового (10.17), то последняя разность (10.16) будет составлять не более 2–3% от наибольшего значения водоизмещения. Такая величина уже находится в пределах точности наших вычислений и может быть пропорционально уменьшена по всем разделам нагрузки масс модели так, что

$$P_i'' = \left(1 + \frac{D_2 - D_2'}{D_2'}\right) P_i(L_p, B_p, T_p, H_p, D_p), \quad i \in \{J\} \quad (10.18)$$

Последнее преобразование и позволяет получить искомое равенство

$$D_2 = \sum_i P_i'' \quad (10.19)$$

Изложенный способ позволяет определять главные элементы проектируемого корабля путем повторной компоновки размещаемого на нем оружия, вооружения и технических средств в рамках главных размерений, полученных аналитическим путем. В том случае, если компоновку выполнить удалось и при этом не потребовалось изменять главные размерения проекта, то никаких дополнительных вычислений не требуется. Такой подход не позволяет говорить о какой-либо предпочтительной компоновке, а только о некоторой достаточной приемлемой. Поэтому учет архитектурно-компоновочных решений здесь заключается только в том, что появляется возможность исключить варианты, явно не обеспечивающие размещение устанавливаемого оружия, вооружения и технических средств.

Значительно большие требования к архитектурно-компоновочным решениям могли бы быть предъявлены при реализации способа "натягивания" главных размерений на полную упаковку размещаемых объектов, о котором упоминалось в параграфе 10.2. Однако при этом в полярный рост встает проблема получения предпочтительной (возможно, оптимальной) компоновки, решение которой еще не получено в теоретическом плане, и поэтому, наверное, рано говорить об использовании этого подхода в задаче определения главных элементов корабля.

**РАЗДЕЛ V**  
**ВОЕННО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЕКТНЫХ И**  
**ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ**

**Глава 11. ЭКОНОМИКА СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО**  
**ПРОИЗВОДСТВА**

**11.1. ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА.**  
**МЕТОДЫ СЕТЕВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ**

Экономика современного судостроительного объединения (предприятия) представляет собой составную часть экономики промышленности. Предметом курса настоящей главы является изучение характера действия и форм проявления объективных экономических законов, механизмов хозяйствования, условий и факторов, обеспечивающих повышение эффективности судостроительного производства.

Промышленность, как таковая объединяет множество отраслей, поэтому экономика промышленного производства имеет свою отраслевую специфику. Однако экономика производства в различных отраслях промышленности имеет и много общего, поскольку она опирается на единую методологическую основу, включает механизм проявления экономических законов в промышленности в целом.

Любое предприятие, согласно Закону Российской Федерации "О предприятиях и предпринимательской деятельности", — это "самостоятельный хозяйствующий субъект, созданный в порядке, установленном настоящим Законом, для производства продукции, выполнения работ и оказания услуг в целях удовлетворения общественных потребностей и получения прибыли".

Судостроительские предприятия согласно этому Закону в настоящее время в основном остались Государственными предприятиями (ГП) или преобразованы в Акционерные Общества

(АО). Государственное предприятие — это предприятие с долей федеральной собственности, превышающей 50 процентов уставного фонда.

Акционерное Общество — это такое объединение, уставной фонд которого разделен на определенное число акций равной номинальной стоимости. Участники АО (акционеры) несут прибыль или несут убытки, связанные с деятельностью общества, в пределах стоимости принадлежащих им акций. Существует две самостоятельные организационно-правовые формы таких предприятий: акционерное общество открытого и закрытого типов. АО открытого типа, в котором, как правило, относятся судостроительные предприятия — обычно более крупные предприятия с так называемыми акционерами-учредителями и обычными акционерами, которые выкупают акции во время открытой подписки или, иначе говоря, во время вторичной эмиссии. Членом АО открытого типа может стать любой гражданин или предприятие, которое приобрело акции АО на фондовой бирже. Следует иметь в виду, что любое акционерное общество управляется по достаточно сложной схеме: совет директоров, правление, генеральный директор, ревизионная комиссия и, наконец, собрание акционеров.

Во всех отраслях промышленности средства производства и продукция на ГП и АО являются собственностью предприятия (акционеров). Процесс воспроизводства основных фондов, организации производства, труда и заработной платы в основных чертах совпадают для всех отраслей промышленности.

**Классификация судостроительных предприятий**

Основным назначением каждого судостроительного предприятия является удовлетворение потребностей вооруженных сил (в том числе ВМФ), которые состоят, во-первых ... в строительстве новых кораблей и, во-вторых ... в периодическом их ремонте. Для выполнения этих задач предприятие имеет различные цеха с разнообразным производственным оборудованием, штат рабочих и инженерно-технического персонала и связано с цепью рядов других заводов, поставляющих сталь, листовую металл, трубы, различные механизмы, оборудование и пр. С последним судостроительное предприятие ведет коммерческие

Работы и они так же, как и оно перед заказчиком, возут материальную ответственность за качество заказа и срок его выполнения.

В зависимости от характера производства, судостроительные предприятия разделяются на три основных группы с соответствующей организацией производства. К первой группе относятся предприятия, занимающиеся исключительно постройкой новых судов (кораблей), т. е. судостроительные заводы и верфи; ко второй — все предприятия, занимающиеся ремонтом судов, т. е. судоремонтные базы и мастерские и, наконец, к третьей — предприятия со смешанным производством, т. е. одновременно строящие новые суда и ремонтирующие старые.

Характерной особенностью чисто судостроительного предприятия является его станционное хозяйство, в состав которого входят стапели, их крановое и транспортное оборудование, площадка для предварительной и секционной сборки, производственные следы и пр.

Судоремонтные предприятия имеют своим основным назначением обслуживание всевозможными видами ремонта кораблей в соответствии с жизненным циклом. В зависимости от характера выполняемого на корабле ремонта, все судоремонтные предприятия имеют то или иное производственное оборудование и устройства. Основными признаками судоремонтного предприятия являются сухие и плавучие доки, слиты, тарсы для стоянки ремонтируемых кораблей, оборудованные кранами большой грузоподъемности, плавучие краны и мастерские.

Предприятия со смешанным производством ведут как постройку новых кораблей, так и их ремонт.

Конструкторскую документацию для строящихся и ремонтируемых кораблей разрабатывают предприятия особого типа — проектно-конструкторские бюро.

#### *Характеристика предприятий по организации производства*

Так как современный военный корабль представляет собой сложное инженерное сооружение, которое охватывает в себе все достижения науки и техники, то по степени сложности изготовления всех элементов корабля и, главным образом, механиков силами самого предприятия, последние разделяются на че-

тыре вида, имеющие различную организацию, номенклатуру цехов и масштабы производства.

1. Судостроительное предприятие автономное, строящее у себя главные механизмы собственной конструкции или по лицензиям других фирм.

2. Судостроительное предприятие полуавтономное, изготовляющее у себя главные механизмы, но не имеющие собственных достаточно развитых и оборудованных цехов (например, цехов отливок и ковочных на стороне).

3. Судостроительное предприятие, строящее только корпуса кораблей и заказывающее на стороне главные и вспомогательные механизмы.

4. Судостроительное предприятие, получившее со стороны не только главные механизмы, но и судостроительный материал в уже обработанном виде.

Первые два вида организации судостроительных предприятий именуются судостроительными заводами, третий вид — судостроительная верфь и, наконец, четвертый вид — судоборочная верфь.

Для военного кораблестроения наиболее характерными являются судостроительные предприятия третьего вида. Подобные предприятия имеют хорошо развитые и оборудованные корпусообрабатывающие цеха и механическое оборудование, необходимые для монтажа технических средств и вооружения на корабле.

Судостроительное предприятие нового профиля, представляющее высшую ступень производственной организации для постройки кораблей, имеет следующую структуру.

Главными являются два подразделения:

А — основное производство: верфи, судовое машиностроение, металлургия;

Б — вспомогательное (обеспечивающее) производство.

Подразделение А включает следующие виды производства: — корпусное с цехами: корпусообрабатывающим, сборочно-сварочным, изготовлением блоков и корпусостроительным (стапельным);

— судомонтажное с цехами: трубопроводным и судомонтажным;

— достроечно-отделочное с цехами: корпусостроечными, малярным, деревообрабатывающим, такелажно-парусным;

— конструкторские цехи и участки, выполнявшие непосредственно на кораблях: электромонтажный, изоляционных работ, нефемонтажные работ;

— машиностроительные с цехами: механические и автоматизации, металлообрабатывающим, механосборочным, дельных вещей, арматурным;

— металлургические цехи: сталелитейный, цветного литья, кузнечно-прессовый.

Подразделение Б включает следующие виды производства:

— ремонтные цехи: ремонтно-механический, ремонтно-электрический, ремонтно-строительный;

— энергосиловые цехи: азотсодержащий, паросило-вой;

— инструментальный цех;

— транспортно-складские: склады, транспортный цех;

— конструкторское бюро завода;

— хозяйственный цех;

— центральную лабораторию.

Подразделение специалистов отдела главного строителя организует постройку кораблей в цехах в течение всего производственного цикла, планирует продвижение работ и осуществляет технический надзор за ними.

Цехи машиностроительного производства, а также металлургические цехи выделены в единое машиностроительное производство, в составе которого работает группа строителей по машиностроению.

Все цехи судостроительного и машиностроительного производства подчинены правому производственному отделу (ППО).

Для судостроительного предприятия вся подготовка производства должна быть единой, руководство которой осуществляется главным инженером. Ему непосредственно подчинены службы главного технолога, главного конструктора, главного энергетика, главного механика и отдела технического кан-

троля, стандартов и норматив, техники безопасности, метрологии, главного металлурга, а также центральная заводская лаборатория. Деятельность служб материально-технического снабжения и поставок комплектующего корабельного оборудования, цехов складского хозяйства и транспорта, отдела капитального строительства, кадров и технического обучения в части подготовки производства координируется техническим бюро предприятия. В его состав также входит бюро планирования подготовки производства по всем разделам.

Приводимая структура, зависящая от характера и масштаба работы, представляется в известной мере условной и разной для различных предприятий. Так, в современных экономических формах хозяйствования намечается тенденция к разукрупнению судостроительных предприятий полного профиля на ряд укрупненных производств. В этом случае, координация производственного процесса, обеспечивающая согласованную деятельность выделенных предприятий, как правило, осуществляется на уровне компании (холдинга), в руководство которой входят на правах членов совета директоров руководители специализированных предприятий.

Иная организационно-структурная схема характерна для проектно-конструкторских организаций, бюро (ПКБ).

Техническое и организационное руководство деятельностью ПКБ осуществляется:

— начальником и главным (генеральным) конструктором бюро;

— главным инженером — первым заместителем начальника и главного конструктора бюро.

Начальник и главный конструктор бюро имеет в непосредственном подчинении:

— главного конструктора по энергетическим установкам — заместителя начальника бюро;

— главного конструктора по электрооборудованию — заместителя главного конструктора бюро;

— заместителя по общим вопросам;

— заместителя по кадрам.

По организационно-структурной схеме ПКБ имеются следующие подразделения:

- проектный отдел;
- корпусный отдел;
- отдел оборудования, площади и дальних связей;
- отдел надубных механизмов, корабельных и специальных устройств;

ЭУ:

- отдел кондиционирования воздуха, холодильных установок, газомашинных и воздушно-реактивных трактов механизмов ЭУ;

— отдел корабельных систем и координация проектно-конструкторских работ по взрывобезопасности кораблей;

- отдел электро-энергетических систем и приводов;

— отдел электрораспределительных устройств и магистральных трасс;

— отдел систем управления комплексов вооружения, радиолокационных средств, средств противозабоеопасности и борсовых информационных управляющих систем;

- отдел вооружения;

- отдел средств связи и навигации;

— отдел стандартизации и конструкторских работ по нестандартному оборудованию;

— отдел заказа материалов, комплексов оборудования и контроля за ходом создания опытных и головных образцов;

- отдел технологии постройки;

— расчетный отдел систем автоматизированного проектирования;

- отдел научно-технической информации и патентоведения;

- отдел надежности и эксплуатации;

- отдел технической документации;

- отдел материально-технического снабжения;

- участок мажорных работ.

Отделы, как правило, подразделяются на секторы.

Помимо административного деления, организационно-структурная схема ПКБ предусматривает также организацию проведения конструкторских работ по проектам. Во главе каждого проекта, выполняемого ПКБ, стоит главный конструктор по проекту (проектант), которому в административном плане подчинены его заместители и группа (отдел) главного конструктора. Все остальные подразделения ПКБ выполняют задания главного конструктора по проекту в плановом порядке. Главный конструктор замыкается непосредственно на руководство ПКБ.

Важное место в организации производства занимает планирование. От продуманности плана предстоящих работ, эффективности контроля за его выполнением и оперативности корректировки во многом зависит успех производства, надежность выполнения договорных обязательств предприятием. Одним из наиболее освоивших в настоящее время инструментов планирования производства является сетевой график, составляющий основу сетевого планирования.

#### Методы сетевого планирования

Методы, используемые в системах сетевого планирования и управления (СПУ), как аппарат научного исследования, могут быть применены для решения широкого круга инженерно-технологических проблем. Эти методы позволяют выявить наиболее характерные типовые действия путем составления и анализа как детерминированных, так и вероятностных сетевых моделей [43, 286].

Основной метод СПУ является такой подход к решению любой сложной проблемы, при котором все составные, взаимосвязанные ее элементы рассматриваются в комплексе как единое целое, как единая функционирующая система.

Применение систем СПУ позволяет:

- произвести наглядный анализ комплекса взаимосвязанных работ производственных и непроизводственных программ;
- прогнозировать ход выполнения программ;
- выявлять резервы времени и ресурсов и оптимально их использовать;

— повысить эффективность управления в целом при оптимальном распределении ответственности между исполнителями и руководителями работ.

Основным плановым документом в системе СПУ является сетевой график (сетевая модель), представляющий графическое изображение последовательности и взаимосвязей, вытекающих мест при функционировании анализируемого комплекса. Теоретической основой сетевого планирования является математическая теория графов.

Граф — это совокупность конечного числа точек (вершины графа) и попарно соединяющих эти вершины линий. Сетевая модель — это разновидность графа. В зависимости от того, что изображают дуги и вершины графа, сетевые модели делятся на три основных вида.

1. Сетевые модели в терминах событий. В этой модели событие является результатом работы и изображается вершиной графа. Дуги показывают взаимосвязь отдельных событий.

2. Сетевые модели в терминах работ. Здесь основной элемент — работа, которая изображается вершиной графа, а дуги показывают взаимосвязь отдельных работ.

3. Сетевые модели в терминах работ и событий. Эти модели являются совокупностью первых двух. В таких моделях работы изображаются дугами графа. События изображаются вершинами графа. Сетевые модели этого типа наиболее распространены.

Системы СПУ по структуре, правилам построения и функционированию отличаются:

1) уровнем руководителя, использующего данную систему СПУ;

2) количеством сетей, описывающих комплекс работ. Если комплекс работ описывается одной сетью, то система СПУ называется односетевой, если же несколькими сетями, с согласованием сроков работ, принадлежащих разным сетям, то система называется многосетевой;

3) объемом сетевой модели. Если сетевой график состоит из 20 000 работ и более, то система СПУ относится к сетевой модели большого объема. Сеть с числом работ от 2000 до 20 000 относится к модели среднего объема. Сеть с числом работ до 2000

называется малобъемной, которая может рассчитываться как с помощью ЭВМ, так и вручную. Выбор технических средств, в том числе ЭВМ, определяется объемом входной и выходной информации системы СПУ, скоростью приема, обработки и передачи данных для управления комплексом работ;

4) числом конечных целей комплекса работ. Если комплекс, описываемый сетевым графиком, предназначен для достижения одной цели, то график одноцелевой. Если конечных целей много, то график многосетевой;

5) планируемыми и контролируемыми параметрами комплекса работ. В зависимости от сочетания этих параметров системы СПУ могут иметь следующие разновидности: время; время—стоимость; время—ресурсы; время—техника—экономические параметры (ТЭП); время—стоимость—ресурсы; время—стоимость—ТЭП; время—ресурсы—ТЭП; время—стоимость—ресурсы—ТЭП.

Наибольшее распространение получили СПУ "время" и "время—ресурсы".

Под ресурсом понимается все, что участвует в работе относительно не изменяясь во времени в количественном отношении (люди, корабли, оборудование, механизмы, снаряжение и др.).

Система планирования и управления позволяет значительно улучшить показатели работы в различных звеньях и органах управления за счет изыскания дополнительных резервов времени, материальных и трудовых ресурсов и более четкой организации планирования работ и мероприятий.

Все системы СПУ имеют стадию исходного и стадию оперативного планирования.

Стадия исходного планирования имеет следующие последовательно выполняемые этапы.

1. Составление сети узловых событий и проведение структурного анализа.

2. Предоставление ответственным исполнителям данных для составления и расчета сетевой модели.

3. Составление сводной сетевой модели.

4. Проверочный расчет параметров сетевой модели.

5. Корректирование или оптимизация планируемых и контролируемых параметров сетевой модели и расчет показателей исходного плана.

6. Утверждение исходного плана и доведение его до исполнителей.

Стадия оперативного планирования имеет периодический повторяющийся три этапа.

1. Сбор и передача первичной информации о фактическом ходе работ.

2. Обработка первичной информации, анализ фактического хода работ.

3. Принятие и доведение решений, обеспечивающих выполнение плана работ, до исполнителей, внесение корректур в сетевой график.

### Основы построения сетевых графиков

Основными элементами сетевых графиков являются работа, событие и путь.

Понятие работы имеет следующий смысл.

1. Работа — это четко ограниченный этап трудового процесса, требующий затрат времени и ресурсов.

2. Ожидание — процесс, требующий затрат времени без затрат ресурсов.

3. Фиктивная работа — это логическая связь между работами, не требующая затрат времени и ресурсов, но показывающая, что возможность начала одной работы непосредственно зависит от результатов другой.

Все работы в сетевых графиках изображаются стрелками. Стрелки показывают направление движения процесса. У всех стрелок проставляются цифры, показывающие затраты времени или ресурсов. Кругами и другими фигурами в сетевых моделях изображаются события графа, т. е. события.

Событие отличается от работы тем, что не является процессом и не связано с затратами времени и ресурсов. Событие есть результат выполнения одной или нескольких работ. Оно не может выступить, если все входящие в него работы не завершены. Понятие события может иметь следующие значения.

Исходное событие — с него начинается весь комплекс работ.

Завершающее событие — им заканчивается весь комплекс работ.

Промежуточные события — события сетевого графика, находящиеся между исходным и завершающим событиями.

Как правило, работы сетевого графика кодируются начальным и конечным / событиями. Например, работы сетевого графика на рис. 11.1 будут иметь коды (1, 2), (2, 6), (6, 7), (1, 4), (4, 5) (5, 7) и т. д.



Рис. 11.1

Любая последовательность работ в сетевом графике, в котором конечное событие каждой работы является началом следующей за ней работы, называется путем.

Путь бывает трех видов.

1. Полный путь — путь сетевой модели от исходного до завершающего события, обозначается  $L$ . Например, (1, 2, 6, 7), (1, 3, 7), (1, 3, 5, 7), (1, 4, 5, 7).

2. Путь, предшествующий данному событию, — путь сетевой модели от исходного события до данного.

3. Путь, следующий за данным событием, — путь от данного до завершающего события.

4. Путь между событиями, из которых ни одно не является исходным или завершающим.

Продолжительность каждого пути сетевого графика  $T(L)$  равна сумме продолжительностей составляющих его работ  $t_i, j$ :

$$T(L) = \sum t_i, j. \quad (11.1)$$

Наибольший по продолжительности путь называется критическим. Он обозначается  $L_{кр}$ , а его продолжительность —  $T_{кр}$ .

На рис. 11.1 критическим является путь (1, 4, 5, 7). Выделение критического пути в комплексе работ является важным преимуществом системы СПУ перед всеми известными системами планирования. Критический путь позволяет сосредоточить внимание на тех работах, которые составляют его и определяют длительность выполнения всего комплекса работ.

Выполнение работ, не лежащих на критическом пути, можно задержать или сместить по времени в определенных пределах и это не отразится на сроке завершения всего комплекса работ.

Таким образом, выделение критического пути является основой для оптимизации плана выполнения работ.

При построении сетевого графика обязательны следующие основные правила.

1. Между двумя событиями может быть заключена только одна работа.
2. Каждая работа может начинаться только после того, как закончатся все предшествующие ей работы.
3. Номера событий не должны быть одинаковыми.
4. В сети не должно быть тупиков.
5. В сети не должно быть событий (кроме исходного), в которые не входит ни одной работы.
6. Через одно и то же событие один и тот же путь не должен проходить дважды.

Порядок составления сетевого графика:

- составление сетевого графика начинается с определения перечня работ;
  - вычерчивание стрелки первой работы от исходного события и указание продолжительности ее в принятых временных единицах;
  - с учетом логической последовательности выполнения работ и черпняющей интерпретируется весь график до завершения события
- или

График можно составить, начиная и с завершающего события, что распространено при планировании военных операций.

Сетевые графики можно объединять и укрупнять. Процесс объединения называется сшиванием графиков. Основой для сшивания служат граничные события, которые принадлежат разным сетевым графикам, но имеют одинаковые значения, определения и обозначения.

Укрупнение (упрощение) сети — процесс уменьшения ее по объему, производимый с целью устранения излишней детализации и повышения наглядности графика при представлении его руководителям различных уровней. Укрупнение производится в сетевых графиках без нарушения их логики и временных параметров.

Укрупнение или изменение степени детализации сетевых графиков позволяет сосредоточить внимание руководителей всех степеней на критических работах, которые могут быть выделены и представлены с различной степенью детализации.

#### Масштабный сетевой график

Сетевая модель, перенесенная на масштабную шкалу времени, представляет собой масштабный сетевой график. При построении масштабного сетевого графика критический путь сети вычерчивается и в масштабе времени чертится на миллиметровой бумаге. График имеет временную ось (в часах) и календарную (в рабочих сутках).

Критический путь изображается сплошной линией, которая показывает, что этот путь не имеет резервов. На календарной шкале наносится количество часов работы, приходящихся на тот или иной день недели. Через эти отсчеты проводится вертикальные пунктирные линии, которые позволяют определить, какие работы следует планировать в те или иные рабочие дни недели.

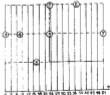


Рис. 11.2



Резервы времени, определяемые с помощью временной шкалы, можно использовать, соотносясь с обстановкой. Поэтому, положение не критических работ и их резервов времени на масштабном графике не является фиксированным. Они могут быть подвижны во времени. Пример масштабного сетевого графика изображен на рис. 11.2.

В качестве приложения сетевого планирования и управления в кораблестроении может быть рассмотрен график жизненного цикла корабля, приведенный на рис. 11.3.

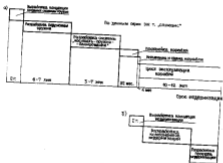


Рис. 11.2

### 11.2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ЭКОНОМИКИ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

#### Основные и оборотные средства

Для ведения процесса производства необходимо наличие трех взаимосвязанных элементов: труда, предметов труда, кото-

рые преобразует человек; средств труда, с помощью которых человек, воздействуя на предметы труда, создает готовый продукт.

Средства труда и предметы труда представляют собой средства производства, которые составляют вещественное содержание производственных средств предприятия. Эти средства являются основными и оборотными.

#### Основные средства

В процессе воспроизводства участвуют различные группы основных средств (рис. 11.4).

Основные средства представляют собой совокупность материально-вещественных ценностей, используемых в качестве средств труда и действующих в натуральной форме в течение длительного времени как в сфере материального производства, так и в непроизводственной сфере.

То есть эти средства функционируют в сфере материального производства и, постепенно изнашиваясь, переносят свою стоимость по частям на создаваемый продукт. Они определяют потенциальные возможности выпуска продукции, служат базой для расчета производственной мощности предприятия.

К основным средствам относятся здания, сооружения, передаточные устройства, рабочие и силовые машины и оборудование, измерительные и регулирующие приборы и устройства, вычислительная техника, транспортные средства,



Рис. 11.4

инструмент, производственный и хозяйственный инвентарь и принадлежность, внутрихозяйственные дороги и прочие основные средства, непосредственно участвующие в процессе производства либо в качестве орудий труда, либо в качестве трудовой силы (табл. 11.1).

Таблица 11.1

Классификация основных средств по группам

Наименование группы	Состав групп	Наименование групп	Структура, %	
			1	2
1. Здания	Корпуса цехов, складов и т. п.	Создание условий для производства	41	31
2. Дорожные	Станции, доки, дороги и т. п.	Выполнение технических функций	9	29
	Электростанции, трубопроводы	Передача энергии от силовых машин к рабочим машинам	3	5
4. Инвентарь	Производственный и хозяйственный инвентарь	Обеспечение выполнения операций	2	1
5. Машины и оборудование	Силовые машины и оборудование, рабочие машины и оборудование	Получение или преобразование энергии, воздействие на предметы труда	40	27
6. Транспортные средства	Автомобили, трактора, плуги	Транспортировка людей и грузов	3	5
7. Инструмент	Все виды ручных и механизированных орудий и приспособлений	Обработка предметов труда	3	2

Примечание: Прямая структура групп в процентном отношении к общему составу основных средств (1) и в абсолютных величинах (2).

К основным средствам относятся также капитальные затраты, вложенные в арендованные здания, сооружения, оборудование и другие объекты, относимые к основным средствам.

В состав капитальных вложений включаются затраты на строительные-монтажные работы, приобретение оборудования, инструмента, инвентаря, прочие капитальные работы и затраты.

В составе основных средств учитываются находящиеся в собственности организации земельные участки, объекты природопользования (вода, недра и другие природные ресурсы).

Завершенные капитальные затраты в арендованные здания, сооружения, оборудование и другие объекты, относимые к основным средствам, зачисляются арендатором в собственные основные средства в сумме фактических расходов, если иное не предусмотрено договором аренды.

Основные средства отражаются в бухгалтерском учете и отчетности по первоначальной стоимости, т. е. по фактическим затратам их приобретения, сооружения и изготовления. Изменение первоначальной стоимости основных средств допускается в случаях достройки, дооборудования, реконструкции и частичной ликвидации соответствующих объектов.

Стоимость основных средств организации погашается путем начисления износа (амортизированной стоимости) и списания на издержки производства (обращения) в течение нормативного срока их использования по нормам, утвержденным в установленном законодательством порядке (за исключением земельных участков, объектов природопользования и других объектов, относящихся к основным средствам, по которым порядок начисления износа устанавливается отдельными нормативными актами).

Организации, основная деятельность которых фиксируется за счет средств бюджета, начисляют износ по основным средствам и показывают его в отчетности.

Не относятся к основным средствам и учитываются в организациях в составе средств в обороте, а в бюджетных организациях — в составе материальных предметов и других ценностей:

а) предметы, служащие менее одного года, независимо от их стоимости;

б) предметы невысокой стоимости независимо от срока их службы;

в) специальные инструменты и специальные приспособления (инструменты и приспособления целевого назначения, предназначенные для серийного и массового производства определенных изделий или для изготовления индивидуального заказа), независимо от их стоимости; обменное оборудование (многократно используемые в производстве приспособления и основным средствам и другие вызываемые специфическими условиями изготовления продукции — прокатные валки, катализаторы и сорбенты твердого агрегатного состояния и т. п.), независимо от их стоимости.

В зависимости от степени участия в производственном процессе основные средства делятся на активную и пассивную часть. К активной части относится те средства, которые непосредственно влияют на величину производственной мощности и объем продукции (рабочие машины и оборудование и др.). К пассивной части относятся основные средства, которые непосредственно не влияют на изменение объема производства, хотя и создают условия для нормального хода производства. Сюда относятся здания и сооружения производственного назначения, силовые машины и оборудование (электростанции, компрессорные установки и т. д.). К непроизводственным основным средствам предприятия относятся его жилье дома, здания и оборудование больниц, детских садов и т. д.

Основные средства, имущество, обязательства и хозяйственные операции для отражения в бухгалтерском учете и отчетности подлежат оценке. Оценка осуществляется в денежном выражении путем суммирования фактических производственных расходов.

Применение других видов оценок допускается в случаях, предусмотренных законодательством Российской Федерации или нормативными актами Министерства финансов Российской Федерации.

Организация осуществляет оценку имущества, обязательств и хозяйственных операций в валюте, действующей на территории Российской Федерации — в рублях.

Записи в бухгалтерском учете по валютным счетам организации, а также по ее операциям в иностранной валюте производятся в валюте, действующей на территории Российской Федерации, в суммах, определяемых путем пересчета иностранной валюты по курсу Центрального банка Российской Федерации, действующему на дату совершения операций. Одновременно указываются записи производятся в валюте расчетов и платежей.

Используется несколько различных видов оценки основных средств в стоимостном выражении

Первоначальная (балансовая) стоимость основных средств включает затраты на приобретение и постройку здания, расходы на строительные-монтажные и наладочные работы.

Эта стоимость служит базой для учета и контроля движения основных средств, определения сумм амортизационных отчислений и платы за средства. Поскольку в процессе эксплуатации основные средства постепенно изнашиваются, используется другой показатель: первоначальная стоимость основных средств за вычетом износа, т. е. остаточная стоимость. Она отражает реально сохранившийся стоимость, т. е. ту, которая еще не перенесена на создаваемый продукт.

В целях приведения стоимости основных средств к современным условиям воспроизводства и определения реальной величины износа периодическим производится переоценка основных средств, так как в первоначальной стоимости основных средств суммируются затраты разных периодов (по мере ввода их в действие).

Восстановительная стоимость основных средств представляет собой стоимость воспроизводства основных средств в данный период. Очевидно, что в разные периоды времени восстановительная стоимость одна и та же основных средств будет различна, так как стоимость их восстановления зависит от стоимости капитального строительства и изготовления основных средств при существующих в каждый период времени ценах и тарифах.

Основные средства, участвующие в процессе производства, постепенно утрачивают полезные свойства, то есть подвергаются износу. Постепенное уменьшение стоимости основных средств

вследствие их износа и переносимые ее на изготавливаемый продукт называется амортизацией основных средств.

Скорость переноса стоимости основных средств на стоимость продукции определяется для каждого вида основных средств нормой амортизации.

Норма амортизации — это установленный размер амортизационных отчислений за год по конкретному виду основных средств, выраженный в процентах к их стоимости.

Рациональное использование основных средств является одним из главных резервов повышения эффективности производства.

Обобщающим показателем, характеризующим уровень использования основных производственных средств, является фондоемкость ( $K_f$ ) — выпуск продукции на один рубль стоимости основных средств

$$K_f = \frac{B}{\Phi}$$

где  $B$  — объем выпущенной продукции (в рублях);  $\Phi$  — среднегодовая стоимость основных производственных средств предприятия (в рублях).

Распространен также показатель фондоемкости (обратный фондоемкости), который характеризует размер основных средств, необходимых для получения единицы объема продукции.

Использование основных производственных средств характеризуется также выпуском продукции на 1 м<sup>2</sup> производственных площадей, на один станок и т. д. Этот показатель раскрывает, насколько рационально используются производственные площади и оборудование, какие возможности имеются для дальнейшего расширения объема производства. Показатель фондоемкости отражает фактическую эффективность действующих основных средств. Рост фондоемкости обеспечивает получение на действующих предприятиях дополнительного прироста продукции.

Влияние научно-технического прогресса на повышение эффективности использования производственных мощностей

идет по двум направлениям: обновление основных производственных средств и модернизация имеющегося оборудования.

### Оборотные средства

Материальной основой оборотных средств является предмет труда. Оборотными средствами являются материальные и денежные ресурсы промышленных предприятий, находящиеся в их распоряжении и выступающие в процессе кругооборота в виде оборотных производственных средств и средств обращения.

В отличие от основных средств оборотные средства участвуют только в одном цикле производства, в ходе производственного процесса меняют свою натуральную форму и целиком переносят свою стоимость на создаваемый продукт (рис. 11.5).



Рис. 11.5

Оборотные производственные средства — это предметы труда, находящиеся в сфере производства (производственные запасы, незавершенное производство).

Средства обращения состоят из стоимости готовой продукции (на складе и отгруженной), средств в расчетах и денежных средств, необходимых для закупки сырья, материалов, выплаты заработной платы.

Одним из показателей, характеризующих эффективность использования средств, является оборачиваемость оборотных средств в днях — продолжительность полного кругооборота от приобретения материалов до реализации продукции.

### *Нематериальные активы*

К нематериальным активам, используемым в течение длительного периода (свыше одного года) в хозяйственной деятельности и приносящим доход, относятся права, возникающие:

— из авторских и иных договоров на произведения науки и объекты смежных прав, на программы для ЭВМ, базы данных и др.;

— из патентов на изобретения, промышленные образцы, на свидетельства на полезные модели;

— из прав на "ноу-хау" и др.

Кроме того, к нематериальным активам относятся права пользования природными ресурсами и организационные расходы.

Нематериальные активы отражаются в учете и отчетности в сумме затрат на приобретение, изготовление и расходов по их доведению до состояния, в котором они пригодны к использованию в запланированных целях. По объектам, по которым производится погашение стоимости, нематериальные активы равномерно (ежемесячно) переносят свою первоначальную стоимость на издержки производства или обращения по нормам, определяемым организацией исходя из установленного срока их полезного использования. Нормы переноса стоимости устанавливаются в расчете на десять лет (но не более срока деятельности организации).

### *Показатели объема производства*

Для оценки объема произведенной продукции используются стоимостные и натуральные показатели. К стоимостным показателям относятся:

- валовая продукция;
- товарная продукция;
- реализованная товарная продукция;
- товарный выпуск;
- нормативно-чистая продукция.

Примером натурального показателя может служить номенклатура продукции.

### **Валовая продукция**

Валовая продукция — это показатель, отражающий весь объем работ, выполненный за определенный период времени.

В валовую продукцию включаются:

- стоимость законченных и частично выполненных работ;
- стоимость производственных услуг, оказанных другим предприятиям и собственному капитальному строительству;
- стоимость выполненных опытных работ для собственных нужд;
- стоимость работ по изготовлению приспособлений и оснастки.

Этот показатель является расчетным и используется во внутриаэроном планировании, а также для статистической отчетности.

### **Товарная продукция**

Товарная продукция — это готовая продукция, принятая отделом технического контроля и заказчиком (если это предусмотрено договором). В этот показатель помимо готовой продукции включается стоимость производственных услуг сторонним организациям.

### **Реализованная продукция**

Реализованная товарная продукция — это готовая продукция, которая оплачена заказчиком.

### **Товарный выпуск**

Показатель объема реализуемой (товарной) продукции в ряде отраслей, имеющих длительные сроки изготовления продукции и высокую стоимость, отличается большой неравномерностью как по годам, так и в течение года. Наиболее заметны эти особенности в судостроении. Поэтому для оценки результатов работы в процессе постройки кораблей используется показатель товарного выпуска. В этот показатель включаются: сумма оплаченных платежей по частичной готовности кораблей, реализованная продукция по несудовым заказам и стоимость оплаченных услуг на сторону, а также стоимость сданных заказчику кораблей, не имеющих платежей по частичной готовности.

Количество и размеры платежей заказчика предприятию определяются процентом технической готовности для головного корабля и по платежным этапам для серийных кораблей.

Техническая готовность корабля — это выражено в процентах отношение плановой трудоемкости выполненных по кораблю работ к полной трудоемкости постройки (ремонта) корабля.

#### Чистая продукция (нормативная)

Все рассмотренные выше показатели объема производства включают в себя всю стоимость продукции — вновь созданную ("живой труд") и стоимость прошлого труда. Исчисленная на такой базе производительность труда снижает уровень достоверности этого показателя, некаждое результативность собственных трудовых затрат предприятия. Таким недостатком лишены показатели объема чистой продукции (нормативной).

Величина чистой продукции (чп) как вновь созданной стоимости может быть определена путем вычитания из объема товарной продукции стоимости использованных предметов труда и средств труда, т. е. всех материальных затрат на производство продукции.

#### Номенклатура продукции

Номенклатурой продукции называется систематизированный перечень выпускаемой предприятием продукции. В зависимости от профиля предприятия в этот показатель может быть включена:

— по судостроению — постройка и сдача кораблей и судов в единицах, процент продвижения технической готовности кораблей и судов с началом постройки более года;

— по машиностроению (приборостроению) — сдача продукции в единицах (комплексах) по номенклатуре.

В заключение следует отметить, что для объективной оценки работы предприятия следует пользоваться системой показателей, включающих как стоимостные, так и натуральные показатели.

### 11.3. ПОДХОДЫ К ЦЕНООБРАЗОВАНИЮ В СУДОСТРОЕНИИ

Цена является одним из наиболее сложных экономических категорий товарного производства. Для правильного определения и применения цены необходимо знать, что лежит в ее основе, какие объективные экономические законы воздействуют на процессы ценообразования и движения цен.

Методология установления цен, принципы и методы ценообразования не меняются в зависимости от того, какой орган устанавливает цены, какова сфера распространения цен, сроки их действия и т. д. Однако теория и практика ценообразования использует не только общепонятные методы решения различного рода проблем, но и создает свои методы, которые позволяют решать специфические проблемы цен. Так, например, возникла необходимость в разработке теоретических и практических методов и приемов определения уровня оптовых цен на вооружение и военную технику, а также проверки и анализа для этих целей себестоимости производства отдельных изделий.

Единство методологии ценообразования не только не исключает, а напротив, предполагает учет объективных различий процессов ценообразования в отдельных отраслях промышленности. Так, например, имеются существенные особенности в ценообразовании на продукцию промышленных предприятий с разной формой собственности, не имеющие единых оптовых цен.

Плановая организация производства включает в себя использование товарно-денежных отношений. Товарно-денежные отношения включают все отношения в сфере товарного производства: торговлю, деньги, цену, финансы.

Под товарным производством понимается такая организация общественного хозяйства, когда продукты производятся отдельными производителями, причем каждый специализируется на выработке одного какого-либо продукта, так что для удовлетворения общественных потребностей необходима купля-продажа продуктов (становящихся в силу этого товарами) на рынке. Существование товарно-денежных отношений обусловлено целым рядом причин, к основным из которых относятся:

— общественное разделение труда;

— различные формы собственности на средства производства;

— углубление и расширение внешнеэкономических связей.

Важной экономической категорией товарно-денежных отношений является товар.

Товар — это продукт, производимый предприятием для удовлетворения потребностей общества и поступающий в потребление посредством товарного обмена.

Товары предприятий имеют два свойства: потребительскую стоимость и стоимость.

Потребительская стоимость. — это стоимость, которая показывает насколько удовлетворены определенные потребности общества тем или иным товаром.

У любого государства имеется также общественная потребность в производстве средств защиты от военной агрессии. Поэтому производство, распределение, обмен и потребление оборонной продукции является составной частью сферы товарно-денежных отношений. В то же время производство оборонной продукции — это производство специфических потребительских стоимостей, специфических товаров. Другими словами, потребительская стоимость продукции оборонных отраслей удовлетворяет потребности вооруженных сил в вооружении и военной технике и потребности военнослужащих в предметах личного потребления.

Чтобы вещь могла быть товаром, она должна прежде всего обладать потребительной стоимостью. Однако наличие у нее потребительской стоимости еще не делает вещь товаром. Вторым свойством, обязательно присущим товару, является стоимость.

Товары, поступающие в обмен, будучи совершенно различными как потребительные стоимости, могут быть приравнены друг к другу в том случае, если в них имеется нечто общее, присущее всей многообразной массе товаров. Этим общим и равным, содержащимся во всех обмениваемых друг на друга товарах, является общественный труд.

Общественный труд, воплощенный в товарах и обнаруживающийся посредством их обмена, представляет собой стои-

мость товаров. Товары, имеющие равную стоимость, обмениваются друг на друга: они эквивалентны, равноценны.

Два свойства товара — потребительная стоимость и стоимость — обусловлены двойственным характером труда, заключенного в товаре. Конкретный труд создает потребительную стоимость. Затраты человеческой рабочей силы вообще, содержащиеся во всех товарах и делающие их однородными и соизмеримыми, представляют собой абстрактный труд. Абстрактный труд создает стоимость.

Стоимость товара имеет качественную и количественную стороны. Качественно, по своей природе, стоимость есть оуществленный в товаре абстрактный труд.

По своей величине стоимость всей массы товаров определяется тем количеством общественного труда, которое затрачивается на производство товара, а производство и обмен товаров совершаются в зависимости от количества воплощенного в них этого общественно необходимого труда, т. е. подчиняются закону стоимости.

Закон стоимости проявляется через механизм цен. Цена, как денежное выражение стоимости, может количественно не совпадать со стоимостью, так как в меновом отношении проявляется не только величина стоимости товара, но и условия его реализации. Однако, как бы ни отклонялись цены от стоимости, впрочем, в зависимости от спроса и предложения, они всегда должны колебаться вокруг стоимости и движение их управляется законом стоимости.

#### Функции цен

При разработке и применении цен учитываются объективно присущие им функции, являющиеся проявлением действия объективных экономических законов, которые определяют ценобразование и, прежде всего, закон стоимости.

В экономической литературе обычно выделяют три функции цены:

- 1) плывово-учетная (эквивалентности обмена);
- 2) распределительная;
- 3) стимулирующая.

Основной функцией цены является планово-учетная функция, которая определяется самой сущностью цены и показывает, во что обходится производство той или иной продукции. Эта функция служит средством измерения всех стоимостных показателей в экономике. С помощью цен считаются затраты как при производстве товаров, так и при их потреблении, перевозке, обращении. Все огромное разнообразие продукции, несопоставимое в своей натуральной форме (штуках, метрах, килограммах и т. д.), можно измерить лишь при помощи цен. Только цены позволяют привести в сопоставимый вид и все многообразие производственно-хозяйственной деятельности предприятий (готовые изделия, работы и услуги промышленного характера, выполняемые предприятием по договорам, изменение остатков незавершенного производства и т. д.).

С помощью цен учитываются не только расходование материалов, но и расходование (использование) машин и механизмов, которые также имеют стоимость, переносимую на стоимость продукции по частям в зависимости от срока их службы.

Ценностная или денежная оценка готовой продукции и затрат дает возможность формировать денежные доходы предприятия. Сумма этих доходов должна соответствовать общей сумме произведенных потребительских товаров и услуг. Таким образом, цены выражают не только сопоставимость отдельных товаров, затрат и результатов производства, но и количественное соответствие между производством и общественными потребностями.

Второй функцией цены является распределительная функция. Она связана с распределением стоимости, в том числе национального дохода. Ее механизмом обусловлен взаимодействие двух объективных экономических закономерностей: сумма конечных цен товаров должна равняться их стоимости; цены по отношению к стоимости являются относительно самостоятельными.

Распределительная функция цен используется при распределении и перераспределении чистого дохода в отраслевом, территориальном и социальном аспектах.

Перераспределение стоимости прибавочного продукта в отраслевом разрезе (между отраслями, подотраслями и предприятиями) происходит путем отклонения цен на различные виды продукции от их стоимости, в результате чего один отраслевой подразделение получает стоимость прибавочного продукта в большем размере, чем создает, другие — наоборот.

Перераспределение стоимости прибавочного продукта в территориальном разрезе (между экономическими районами) зависит от структуры ввоза—вывоза средств производства и потребления. Если из экономического района вывозится продукция, цены на которую установлены выше стоимости, то происходит перераспределение стоимости прибавочного продукта в пользу производителей, и наоборот.

Существенное значение имеет использование цен для распределительных отношений в социальном аспекте между различными классами и группами населения. Здесь в наибольшей мере проявляется сознательное отклонение цен от стоимости. Значительную роль при этом играют розничные цены, которые используются государством в качестве определенного рычага перераспределения доходов между различными слоями населения.

Третьей функцией цены является стимулирующая. Эта функция цены широка и многогранна.

Экономический смысл стимулирующей функции цены состоит прежде всего в преднамеренном, целеном отклонении цены от стоимости.

С помощью цен стимулируется технический прогресс, повышение качества продукции, обновление ее ассортимента, более экономное использование материальных и природных ресурсов, рациональное размещение производительных сил.

Стимулирующая функция проявляется в различных формах: в более обоснованном учете затрат на производство; дифференциации нормативного уровня рентабельности; установлении системы скидок (надбавок); научно обоснованном определении уровня цен; применении ступенчатых цен и т. д.

Большие стимулирующие возможности кроются в установлении правильных соотношений цен на аналогичные и взаимозаменяемые изделия. Правильные соотношения цен могут



создавать у потребителей заинтересованность в использовании определенных видов продукции. Как правило, многие производственные нужды могут быть удовлетворены разными способами. Электроэнергию можно получать, сжигая различные виды топлива: каменный и бурый уголь, мазут, торф и т. д. Машину можно изготовить из разных видов металла. Сам металл может быть различной конфигурации, различного профиля проката и т. д.

Для оборонной продукции важной является стимулирующая функция цены. С ее помощью осваивается новая техника, поощряется производство дефицитных видов продукции (например, запасных частей, в ценах на которые действующими нормативными документами предусматривается более высокая норма рентабельности), стимулируется более эффективное использование материальных и трудовых ресурсов. Однако наибольшее значение для цен на оборонную продукцию имеет все же планово-учетная функция, позволяющая точно отразить в ценах на указанную продукцию затраты на ее производство. Чем точнее цены отражают необходимые затраты, тем более точно определяются расходы общества на оборону, распределяется национальный доход. Эта функция позволяет не только правильно планировать, но и, что очень важно, контролировать затраты на производство.

Виды цен, применяемые в Российской Федерации.

Цена выражает стоимость товара. В Российской Федерации приняты следующие виды цен:

- оптовые;
- закупочные;
- цены на продукцию строительства;
- тарифы на услуги;
- договорные (розничные).

Рассмотрим кратко их особенности.

Оптовые цены — это те, по которым продукция совершает оборот внутри промышленности.

Закупочные цены — по ним сельскохозяйственная продукция продается колхозам и совхозам, а также населенным государственным и кооперативным организациям.

Цены на продукцию строительства (сметные стоимости) — это цены, с помощью которых ведутся расчеты заказчиков с подрядными строительными организациями за построенные объекты или произведенные работы. Эти цены используются также для оценки основных средств промышленных предприятий.

Тарифы на услуги — это особый вид цен, который действует на транспорте, в сфере обслуживания и т. д.

Договорные (розничные) цены — это цены, по которым продукция реализуется населению через предприятия торговли.

Схема образования цен представлена в таблице 11.2

Таблица 11.2

Структура различных видов цен

Себестоимость изделия	Прибыль	Налог на добавленную стоимость	Индержки и прибыль обычных организаций	Индержки и прибыль торговых организаций
Оптовая цена предприятия				
Оптовая цена промышленности				
Договорная (розничная) цена				

Структура цены

Структурой цены называется процентное соотношение отдельных элементов цены. Каждая разновидность цены состоит из отдельных частей стоимости, выраженной в соответствующих денежных формах. Эти части называются элементами цены.

Среди них различают:

- себестоимость;
- прибыль;
- налог на добавленную стоимость;
- обычные и торговые наценки.

Себестоимость — это выраженные в денежной форме затраты предприятия на израсходованные средства производства, а

также на оплату труда при производстве и реализации продукции. В ходе производственно-хозяйственной деятельности эти затраты должны возмещаться за счет выручки от продажи готовой продукции.

**Прибыль** — это та часть стоимости продукта, которая после его реализации поступает как чистый доход предприятия.

Налог на добавленную стоимость представляет собой форму изъятия в бюджет части добавленной стоимости, создаваемой на всех стадиях производства и определяемой как разница между стоимостью реализованных товаров, работ и услуг и стоимостью материальных затрат, отнесенных на издержки производства и обращения.

Бытовые и торговые наценки (накидки) предназначены для возмещения издержек обращения и обеспечения прибыли социально-бытовых и торговых организаций.

В зависимости от структуры (см. таблицу П.3), а также сферы использования различают оптовые цены предприятия и оптовые цены промышленности (в литературе и документах можно встретить договорные оптовые цены).

**Оптовая цена предприятия** — это цена, по которой производится расчеты с предприятием — производителем продукции.

**Оптовая цена промышленности** — это цена, по которой продукция реализуется оптовым потребителям.

#### **Виды цен на военную продукцию**

Из рассмотренных выше разновидностей цен при промышленном производстве военной продукции наиболее распространенной является оптовая цена предприятия.

В зависимости от стадии разработки, масштабов производства на изделия военной техники (ВТ) могут быть установлены следующие виды цен:

- лимитная цена;
- плановая условная цена;
- ориентировочная оптовая цена;
- договорная оптовая цена.

#### **Лимитная цена**

Лимитная цена применяется на новые, впервые проектируемые изделия, которые намечаются к серийному выпуску. Она устанавливается на начальной стадии разработки проекта изделия и является обязательным параметром технического задания на проектирование.

Разрабатывает лимитную цену организация, выдающая задание на проектирование нового изделия. Как и само задание, лимитная цена согласовывается с проектантом. Лимитная цена не может служить основанием для взаимных расчетов. Применяется она в технико-экономических расчетах.

#### **Плановая условная цена**

Эта разновидность цены, так же как и предыдущая, относится к ценам, устанавливаемым на новые образцы военной техники и основные комплектующие изделия к ним, предназначенные в дальнейшем для серийного их производства. Применяется она для расчетов планов, а также для определения объема финансирования по смете Министерства обороны Российской Федерации и в тактико-технико-экономических расчетах. Плановая условная цена, как правило, не может служить основанием для взаимных расчетов.

#### **Ориентировочная оптовая цена**

Ориентировочная оптовая цена устанавливается на впервые освоенные изделия определенной номенклатуры, предназначенные к серийному производству, когда недостающие данные позволяют заказчику и исполнителю при заключении контракта оценить плановые издержки только ориентировочно. Стороны согласовывают ориентировочную оптовую цену в целом и устанавливают цену первого этапа.

#### **Договорная оптовая цена**

Договорная оптовая цена устанавливается на серийную продукцию оборонного назначения.

К серийной продукции оборонного назначения относятся вооружение, военная техника, основные комплектующие изделия

к ним и другие изделия (работы, услуги), разрабатываемые на основе технического задания Министерства обороны Российской Федерации, а также других государственных заказчиков по оборонному заказу, и выпускаемые по технической документации и техническим условиям, согласованным с этими организациями.

При формировании договорных оптовых цен необходимо руководствоваться "Инструкцией о порядке формирования договорных оптовых цен на серийную продукцию оборонного назначения", утвержденную Комитетом Российской Федерации по политике цен, которая обеспечивает единый подход к формированию договорных оптовых цен на серийную продукцию оборонного назначения, в том числе поставляемую по государственным контрактам. Эта инструкция применяется всеми заказчиками и изготовителями оборонной продукции независимо от подчиненности и форм собственности, а также для определения стоимости ремонта и других работ, осуществляемых предприятиями и организациями промышленности в заводских условиях.

При установлении договорных оптовых цен на конкретные виды вооружения, военой техники, имущества, работы и услуги учитываются основные технические, производственные и (или) экономические особенности производства, а также факторы, обеспечивающие экономическую заинтересованность предприятий в производстве продукции оборонного назначения.

#### *Порядок и методы формирования цен*

Договорные оптовые цены на продукцию оборонного назначения разрабатываются предприятиями и согласуются с заказчиками.

При их формировании учитывается:

— затраты в соответствии с "Положением о составе затрат по производству и реализации продукции (работ, услуг), включаемых в себестоимость продукции (работ, услуг), и о порядке формирования финансовых результатов, учитываемых при налогообложении прибыли", а также отраслевые особенности, утвержденные в установленном порядке и другими законодательными актами;

— прибыль в установленном размере;

При формировании в контрактах стоимости создания предпочтительными научно-технической продукции прибыль определяется по согласованию сторон на основе утвержденного расчетного (базового) уровня рентабельности организации исполнителя работ. При этом возможны изменения ее размеров в зависимости от научно-технического уровня и эффективности создаваемой продукции, степени риска исполнителя и других условий выполнения работ.

Министерство экономики Российской Федерации с участием Министерства обороны Российской Федерации и Министерства финансов Российской Федерации может вносить изменения в нормативы рентабельности по отдельным видам оборонной продукции с учетом финансово-экономического положения предприятия, а также на некоторые изделия, имеющие приоритетное значение.

Величина затрат, как база цены, может определяться следующими методами:

- прямым расчетом по статьям калькуляции, исходя из норм расхода и действующих или прогнозируемых цен;
- путем индексации сложившихся затрат по согласованным статьям калькуляции;
- введением расчетного коэффициента изменения затрат;
- с использованием экономико-математических моделей (равновесной) изменения затрат.

На изделия, отличающиеся от аналогов улучшенным отдельными характеристиками (в том числе и модифицированные изделия), обоснованное изменение договорных оптовых цен может осуществляться путем сравнительной оценки степени изменения основных параметров и производственных затрат.

В случае использования согласованных с заказчиком методов расчета на основе сравнительных тактико-технико-экономических характеристик однородной продукции для расчетного коэффициента изменения затрат, договорные оптовые цены определяются на базовые изделия. Цены на остальные изделия группы формируются по установленным зависимостям (коэффициентам, формулам и т. д.)

Продукция реализуется по договорным ценам с учетом налога на добавленную стоимость в соответствии с действующей инструкцией о порядке исчисления и уплаты налога на добавленную стоимость, изданной на основании Закона Российской Федерации "О налоге на добавленную стоимость", и всех изменений и дополнений, принятых на дату реализации.

Сроки действия договорных оптовых цен на серийную продукцию оборонного назначения устанавливаются с учетом изменений экономических условий производства и реализации по согласованию с заказчиками. Основанием для изменения цен может быть:

- введение новых государственных актов, влияющих на изменение состава затрат на производство и реализацию;
- дополнительные затраты на единицу продукции, связанные с изменением серийности выпуска;
- повышение заработной платы при росте цен на потребительские товары и услуги;
- другие, независящие от деятельности предприятий, причины, влияющие на уровень затрат на производство и реализацию продукции.

Цены на продукцию с циклом производства более одного года (кораблестроение), оплата которой производится по этапам изготовления, подлежат уточнению в сроки, установленные по согласованию сторон, в части текущих затрат до конца изготовления путем индексации по согласованным статьям расходов. Для проведения окончательных расчетов в год реализации изделий с длительным циклом производства предприятия формируют цену в установленном порядке.

Все цены на указанную продукцию представляются на регистрацию.

#### *Порядок согласования и контроля цен*

Предприятие согласовывает с заказчиком договорные цены на продукцию оборонного назначения, поставляемую непосредственно ему, а также по номенклатуре основных комплектующих изделий. При согласовании договорных цен предприятие представляет заказчику (потребителю) необходимые расчетно-калькуляционные материалы, обосновывающие их уровень. До-

говорные оптовые цены оформляются протоколом. Заказчик (потребитель) продукция не более чем в 30-дневный срок со дня получения материалов согласовывает уровень договорной цены. При несоблюдении указанного срока цена считается согласованной. Разногласия, возникающие при согласовании цен, рассматриваются Министерством экономики Российской Федерации с участием заинтересованных сторон, решение которого является окончательным. В случае необходимости может осуществляться ведомственная независимая или совместная межведомственная технико-экономическая экспертиза по обоснованию уровня оптовой цены. В двухнедельный срок принимается решение о регистрации цены на согласованном уровне, с отклонением от него или об отказе в регистрации, и сообщается изготовителю и заказчику.

Для информирования и осуществления координации изменений договорных оптовых цен по видам продукции оборонного назначения федеральным органам регулирования отраслями промышленности (или, по их указанию, головным организациям по направлениям техники) рекомендуется формировать на основании протоколов сборки оптовых цен и доводить до заинтересованных организаций.

Органы, осуществляющие регистрацию цен, обеспечивают систематический контроль правильности установления и применения предприятиями цен на продукцию оборонного назначения.

Заказчик имеет право осуществлять контроль за уровнем договорных оптовых цен на основе анализа первичных и сводных планово-учетных документов предприятия.

#### **11.4. ЗАДАЧИ ОРГАНОВ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ ВМФ ПО ЭКОНОМИЧЕСКОЙ РАБОТЕ, ОСНОВЫ ВОЕННОГО МАРКЕТИНГА**

Экономическая работа органами кораблестроения ведется на различных уровнях по широкому кругу направлений. На уровне Управления кораблестроения ВМФ в ее состав входят подготовка и представление документов по текущему и перспективному планированию в рамках программы военного корабле-

строения, обеспечение договорной работы с предприятиями, участвующими в выполнении заказов по номенклатуре Управления, распределение и контроль за продолжением поступающих в соответствии с договорами ассигнований, анализ экономической деятельности подчиненных организаций и предприятий — поставщиков продукции. В целом вся деятельность Управления кораблестроения нацелена на обеспечение наиболее эффективного использования выделяемых средств и обоснование потребности этих средств на перспективу.

Непосредственный контроль за экономической деятельностью предприятий в части выполнения ими оборонного заказа и в целом в плане экономической эффективности их производственной деятельности осуществляется аппаратом военных представителей Министерства обороны на этих предприятиях.

Научное обеспечение экономической работы в интересах заказов военного кораблестроения, а также контроль за экономической деятельностью организаций, выполняющих ранние этапы проектов (до технического проекта включительно) и ведущие научные исследования и опытно-конструкторские работы, осуществляется ЦНИИ МО во взаимодействии с военными представительствами на этих предприятиях.

Экономическая деятельность заказывающих органов военного кораблестроения складывалась десятилетиями, образовав к концу 80-х годов достаточно отлаженный и четко работающий механизм. В результате политических и экономических преобразований, происшедших в стране после 1991 г. принципиально изменилась производственно-экономическая ситуация на предприятиях оборонного комплекса и, в частности, судостроительной отрасли. При этом подверглись серьезному изменению как система ассигнований оборонных заказов, так и взаимоотношения заказывающих органов Министерства обороны и подразделков по этим заказам в лице предприятий и организаций промышленности.

Вся экономическая деятельность заказывающих органов Министерства обороны в области военного кораблестроения регламентируется Законами Российской Федерации, Указами Президента РФ, подзаконными актами Минобороны и Мин-

фина, внутренними документами Министерства обороны и другими документами. Многие из этих документов создавались еще до 1991 года, но они продолжают действовать и в значительной мере сохраняют свою актуальность. Вместе с тем, существует потребность в создании (переработке) и новых документов. Это, прежде всего, относится к основным условиям поставок вооружения и военной техники для нужд ВМФ, нормированию процесса ценообразования на продукцию военного назначения, вопросам размещения заказов и порядку контроля экономической деятельности предприятий новых форм собственности, правовым вопросам исполнения обязательств по договорам и т.п.

Одним из основополагающих документов, определяющих наиболее принципиальные производственные и экономические параметры всего процесса военного кораблестроения на ближайшее и дальнюю перспективу, является программа военного кораблестроения. В качестве одного из результатов происшедшей реорганизации национальной экономики возникла необходимость учета в практике планирования и реализации кораблестроительных программ принципиально нового характера социально-экономических процессов. В отличие от экономики периода до 1991 г., когда между государством как заказчиком военной продукции и государственными предприятиями существовали детерминированные экономические отношения, современные принципы взаимодействия свободных экономических субъектов приобрели стихийный характер. В результате, если теоретически основой прежней системы планирования составляла преимущественно группа балансовых методов, то планирование в современных условиях должно опираться на методологию принятия экономических решений в условиях неопределенности.

Попытки применения традиционных способов военного программирования без учета современных условий потерпели очевидную неудачу — ни один из планов строительства не оказался состоятельным, и прежде всего — с точки зрения финансовой реализуемости.

Источником неопределенности, приводившей задачу программного планирования военного кораблестроения к вероятностной схеме, несколько. Прежде всего это прогнозная оценка

доли расходной части государственного бюджета, которая будет выделяться на военное кораблестроение на каждый год планируемого периода. При определении величины этой доли недостаточно опираться на ее значение в предыдущем году. Необходимо также учитывать общее экономическое положение в стране и внутреннюю политику Правительства по отношению к своим обязательствам по государственному заказу. Результатом такого анализа должна быть прогнозная оценка так называемого коэффициента наполнения выделенных ассигнований, отражающая степень выполнения Правительством своих обязательств по договорам генеральных заказчиков с предприятиями, выполняющими оборонный заказ. Кроме этого, должна выполняться также оценка ритмичности поступления ассигнований, непосредственно влияющей на обеспеченность предприятий оборотными средствами и необходимость привлечения сторонних кредитов.

Другим источником неопределенности экономических оценок программы военного кораблестроения являются уровни инфляции на всех этапах планируемого периода. При этом, необходимо различать официальный (или соблаженный) прогнозируемый уровень инфляции и ожидаемый рост цен на производимую продукцию.

Задываясь ценами предлагаемых к закупке кораблей на основании аналогов или прототипов, Заказчик решает распределительную задачу и получает некоторую программу военного кораблестроения. При этом, как бюджетные возможности Заказчика, так и цены строящихся кораблей ранее предполагались детерминированными. В современных условиях под воздействием быстро меняющейся экономической ситуации цены на корабли становятся вполне определенными только после завершения сделки (корабль построен, работы по нему выполнены и оплачены).

Названные причины, приносящие в задачу программного планирования военного кораблестроения значительную степень неопределенности, и позволяют интерпретировать совокупность экономических аспектов плана как случайные события или процессы, подчиняющиеся стохастическим закономерностям.

Приложениями вероятностного подхода являются две основные постановки задач: определение уровня надежности

сформированной кораблестроительной программы и определение финансовых ресурсов, обеспечивающих гарантированное (с заданной вероятностью) ее выполнение. Решение этих задач осуществляется в рамках работ, проводимых в ЦНИИ МО на этапе программного планирования военного кораблестроения. Действующими документами по планированию предусматривается разработка программы военного кораблестроения на периоды десять и пять лет с последующей корректировкой при получении контрольных цифр по бюджету каждого текущего года. Практически же в течение года необходимость в оценочных программных расчетах возникает неоднократно. Указанная работа требует организации накопления, обобщения и систематизации исходных данных, наличия работоспособных и отвечающих текущей производственно-экономической ситуации математических моделей, а также постоянно корректируемого в соответствии с выполняемыми научно-исследовательскими и проектными работами, принимаемыми по ним управленческими решениями разного уровня номенклатурного плана проектирования и строительства кораблей ВМФ. Вся эта деятельность предполагает высокую квалификацию исполнителей и четкую организацию работ.

Плано-условные цены кораблей закладываемые в программу военного кораблестроения, еще не являются основанной для формирования договорной (контрактной) цены с заводом — строителем корабля. Эта работа требует более глубокого изучения условий конкретного производства, межзаводской кооперации и складывающейся экономической конъюнктуры. Предшествующая практика ценообразования основывалась исключительно на нормативном методе учета затрат и плановом уровне рентабельности, устанавливаемых, по существу, одним правительством. Участие в ценообразовании заводо-строителей и Заказчика сводилось, для первых — к "обходу" нормативов и максимальному завышению издержек и цен, а для второго — к попыткам калькуляционного контроля формируемой таким образом стоимости строительства корабля.

С практической отменой плановых нормативов издержек и при монопольной структуре отрасли значительный приоритет в

процессе ценообразования получили судостроительные предприятия. Возникла опасность, когда роль Заказчика будет сведена к проверке правильности финансовой "арифметики" предлагаемых верфями калькуляций. Общая направленность деятельности Управления кораблестроения на обеспечение наиболее эффективного использования выделенных средств обязывает его организовывать работу органов военного кораблестроения по контролю цен как аналогичную деятельности аудиторов, исключая при этом методы и, что самое важное, получение необходимой исходной информации балансов за несколько предшествующих лет, отчетных форм по прибыли и ее использованию и т. д. (Аудитор (англ. *auditor*) — ревизор, проводящий контроль (проверку) деятельности компаний. Различаются внешний и внутренний аудитор. Внутренний аудитор — это служащий той компании, деятельность которой он ревизует, внешний аудитор — это ревизор, не зависящий от проверяемой компании). При отсутствии полной информации любая другая контрольная деятельность представляется неэффективной.

Сегодня получение исчерпывающей информации о финансово-экономической деятельности предприятий еще только начинает обрабатываться. При этом юридическим основанием для доступа к внутренним финансовым документам предприятия чаще всего служат условия договора. Наряду с информацией о деятельности предприятия Заказчик может использовать собственные стоимостные нормативы, получаемые в результате накопления и статистической обработки данных о ценах ранее построенных или спроектированных кораблей.

Обоснованием эффективности статистического подхода могут служить следующие теоретические положения микроэкономики:

- средние (на единицу продукции) переменные издержки постоянны для любого объема производства и при неизменности технологии практически совпадают со среднестатистическими (что, собственно, и отражалось типовыми нормативами);
- средние (на единицу продукции) постоянные (администрация и др.) издержки обратно пропорциональны объему про-

изводства (хотя норматив постоянных расходов не ставил их размеры в зависимость от объема производства);

- на значительном промежутке времени основу базисной цены (под базисной ценой понимается будущая стоимость — сумма денег, которую предприятие должно получить после поставки корабля Заказчику) составляют издержки предприятия;

- при неизменности технологии (отсутствии значительных инвестиций), а значит и технического уровня выпускаемого продукта, совокупные издержки на единицу продукции зависят только от загрузки производственных мощностей предприятия.

Таким образом, получив статистические оценки стоимости (цены) единицы продукции за период, в течение которого практически не осуществлялось крупномасштабное инвестирование в судостроительную отрасль (в новые технологические линии, доки, здания и т. п.), можно использовать их для контроля цен заводов — строителей кораблей в течение последующего периода до тех пор, пока такое инвестирование не приведет к принципиальному изменению технологического уровня производства. Увеличение же издержек, связанных с неэффективностью работы администрации (недостаток оборотных средств, банковские кредитные ставки, нарушение кооперации и т. д.) предприятий и промышленно-производственного персонала, не могут служить основанием повышения уровня цен на военное кораблестроение.

Поскольку в течение ближайшего десятилетия (исходя из длительности экономических циклов) крупные инвестиции в судостроение маловероятны, предлагаемый подход имеет право на существование.

Основными принципами, которые должны быть положены в основу контрактной цены, являются:

- принцип рационального потребительского поведения Заказчика — стремление к эффективному расходованию финансовых ресурсов;
- принцип ограниченности финансовых ресурсов;
- принцип целевого назначения и одновременности расходования средств;
- принцип доминирования технологических факторов ценообразования (микроэкономик предприятия) над параметри-

ческими (тактико-техническими характеристиками) факторами создания корабля;

— принцип определяющего значения монополярной структуры военного кораблестроения в ценообразовании.

Одним из основных направлений военно-технического обеспечения деятельности предприятий и организаций промышленности при создании или нового вооружения и военной техники на современном этапе является внедрение системы финансово-экономических регуляторов и механизмов, направленных на создание экономической заинтересованности предприятий различных форм собственности в проведении работ по выполнению оборонных заказов.

К таким регуляторам можно отнести распределение оборонных заказов между предприятиями-претендентами на конкурсной основе и проведение экономических экспертиз.

Предложение подрячкам заказа на конкурсной основе имело место и в период до 1991 г. Однако такие конкурсы, как правило, организовывались отраслевыми министерствами и не преследовали целей экономической стимуляции. В современных условиях, когда источниками финансирования и ответственность за эффективность вложенных средств являются исключительной прерогативой Министерства обороны (генерального заказчика), конкурсы становятся мощным регулятором экономической заинтересованности производителя, не позволяя ему завышать цены на продукцию, поднимают ее качество.

В терминах современной экономики конкурсы (тендеры) объявляет Заказчик, который устанавливает его условия (в том числе и применительно к самим предприятиям — участникам тендера), гарантирует объективность проведения тендера и охраняет авторские права (коммерческой тайны) участников.

Если предлагается разработка проекта перспективного корабля, то условия тендера могут включать сроки представления проектных документов, их объем и форму представления, тактико-техническое задание на проектирование, требования к организации-разработчику и др. В том случае, если объявляется тендер на строительство, то проект корабля рассматривается как одно из требований тендера, а основным предлагаемым доку-

ментом становится бизнес-план строительства и предлагаемая контрактная цена.

Вся работа по организации и проведению тендера ведется органами военного кораблестроения. После проведения тендера и определения основного подрядчика предполагаемых работ, в организациях Заказчика производится анализ и готовится решение о реализации результатов тендера и степени участия в данной работе и процессах военного кораблестроения вообще традиционных разработчиков (производителей), которым на этом этапе добиться успеха не удалось.

Технико-экономическая экспертиза цены (стоимости) той или иной работы по созданию и серийному производству кораблей, комплектующему их вооружению и военной техники, как правило, проводится представителями Заказчика на предприятии (военными представителями) на уровне калькулирования стоимости продукции. В случае ее правильного проведения, экспертиза является действительным фактором, оказывающим влияние на обоснованность распределения подрядчиком затрат на те или иные статьи расходов. В этом плане экономическая экспертиза может рассматриваться как средство повышения эффективности вводимых в создание для Военно-Морского Флота вооружения и военной техники финансовых средств.

В то же время, большой объем информации, необходимой для обработки, множество разноплановых работ, проводимых в интересах ВМФ, а также большое количество организаций, занятых в этих работах, наряду с отсутствием достоверной статистической информации об их предпринятой деятельности, ставят под сомнение возможность использования экономической экспертизы в качестве рабочего инструмента систематического контроля деятельности предприятий.

Таким образом, применение экономической экспертизы можно рассматривать как дополнительную возможность контроля Заказчиком правильности распределения исполнителем финансовых средств, выделенных на проведение той или иной работы. При этом основное внимание следует сосредоточить на внедрение экономических стимулов, побуждающих подрядчика к снижению себестоимости выпускаемой им продукции. Тогда с



помощью экономической экспертизы можно будет решать ограниченный круг задач, таких, например, как спорные вопросы, возникающие при заключении контракта и в ходе его выполнения, и др.

Вследствие происшедших экономических преобразований и формирования рынка производителей оружия, вооружения и техники для Военно-Морского Флота вычленилось новое актуальное направление в деятельности заказывающих органов военно-го кораблестроения. По современной терминологии эта деятельность соответствует такому понятию, как маркетинг (в данном случае — военный маркетинг). В общем случае под маркетингом (от англ. marketing) понимается комплексная система организации и управления производственной, коммерческой и сбытовой деятельностью предприятия, ориентированной на выявление неизвестных и неудовлетворенных запросов потребителей. С другой стороны маркетинг является одним из важнейших способов активизации конкурентных начал рыночной экономики. Это также качественно новая философия производства и сбыта продукции и услуг в условиях развитой рыночной экономики.

Главными целями маркетинга является увеличение прибыли, исследование и прогнозирование емкости рынка, индекс цен, товарной конъюнктуры, определение потенциальных потребителей и производителей, изучение внутренней и внешней среды его развития, разработка, производство и сбыт товаров и услуг, пользующихся спросом, формирование спроса у потребителей на новые товары, услуги и виды.

Основными функциями маркетинга являются: выявление существующего и потенциального спроса покупателя на товары и услуги посредством комплексного исследования состояния рынка и перспектив его развития, организация научно-исследовательской деятельности по созданию новых образцов продукции, а также улучшение прежних моделей в соответствии с запросами потребителя, координация и планирование производства соответствующих товаров, инвестиционной и финансовой политики, определение наиболее эффективных форм и методов сбыта продукции, регулирование всей экономической деятельности, включая руководство производством, транспортировкой,

упаковкой, сбытом, рекламой, техническим обслуживанием и другими услугами и мероприятиями по расширению сбыта и борьбе за реализацию намеченных программ, формирование и реализация ценовой политики, информационное обеспечение маркетинга.

Управление маркетингом осуществляют специальные службы. Их структура может строиться по функциональному принципу, видам выпускаемой продукции, районам ее распределения, сегментам рынка и т. п. В составе службы имеются специалисты по анализу рыночной конъюнктуры, ценовой политике, сбыту, научным исследованиям и др.

В нашей стране многие годы в связи с недооценкой товарно-денежных отношений рыночные структуры почти не развивались. В настоящее время в условиях перехода к рыночным отношениям использование маркетинга приобретает весьма важное значение, так как он представляет собой универсальный инструмент реализации проблем внутреннего и внешнего рынка. Формирующиеся рыночные отношения делают необходимой организацию маркетинговой деятельности и применительно к военному кораблестроению. В отличие от общих определений маркетинга, приведенных выше, военный маркетинг, помимо того, что также безусловно призван выступать в качестве новой философии производства и способом активизации конкурентного рынка, представляет собой систему организации и управления деятельностью предприятий оборонного комплекса с целью обеспечения максимальной эффективности вкладываемых в него средств. При этом, аналогом потребителя при проведении военного маркетинга в области военного кораблестроения становится сам Военно-Морской Флот, чьи интересы и должны быть в наибольшей степени удовлетворены в результате маркетинговой деятельности. С другой стороны, являясь частью ВМФ, его заказывающие органы в сфере своей маркетинговой деятельности должны также включать административную, научно-исследовательскую и общественную деятельность, направленную на формирование в законодательных структурах власти убежденности в необходимости создания и поддержания в постоянной

боевой готовности Военно-Морского Флота, достойного такой великой морской державы, как Россия.

Замечательно большое парадоксы возникают между военным маркетингом и его общепринятым пониманием, когда речь идет о деятельности заказывающих органов при экспорте кораблей и другой военно-морской техники. Здесь Заказчик выступает в качестве одной из официальных сторон государства, обеспечивающей легитимность сделки. На него возлагается контроль за сохранением государственной тайны, недопущением передачи высоких технологий, предотвращением сделок со сторонами, могущими угрожать нашей национальной безопасности. В то же время, размещение экспортных заказов на отечественных предприятиях оборонного комплекса, выполняющих одновременно и заказы Министерства обороны, благоприятно воздействует на экономическое положение этих предприятий, создает условия для более эффективного вложения средств по оборонным заказам.

В процессе своего развития военной маркетинг проходит ряд этапов.

На первом этапе осуществляется научные исследования по следующим направлениям:

— определяется потребность ВМФ в создании кораблей данного класса, формируется облик корабля и определяется их потребное количество в составе флота;

— выполняется анализ возможностей промышленности по созданию корабля и основных комплектующих его оружия, вооружения и технических средств в предполагаемые сроки;

— производится экономическая оценка стоимости создания головного и серийного кораблей, затраты на проведение опытно-конструкторских работ в обеспечение его создания. Уточняются сроки создания корабля с учетом возможных ежегодных ассигнований по программе военного кораблестроения.

На втором этапе осуществляется выбор предполагаемых исполнителей работ (НИОКР, проектирование, строительство), проводится экспертиза, аудиторские проверки, организуется тендеры. Рассматриваются предложения головных исполнителей по кооперации контрагентов.

Работы второго этапа сопровождаются разработкой планов и графиков, обеспечивающих выполнение работ, а также докладной руководству различного уровня для принятия решения.

На третьем этапе осуществляется реализация выданного оборонного заказа. Выполнение работ обеспечивается научно-техническим сопровождением (группа главного надзирающего от ВМФ) и производственным и экономическим контролем со стороны военных представителей Министерства обороны.

## Глава 12. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТОИМОСТИ СОЗДАНИЯ И СОДЕРЖАНИЯ КОРАБЛЯ

### 12.1. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЗАТРАТ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО КОРАБЛЯ

#### *Прогнозирование стоимости проектирования корабля*

К стоимости проектирования корабля можно отнести стоимость НИР, ОКР, разработки проекта корабля, проектных работ контрагентов, авторского надзора, материалов, командировочных, прочих прямых и накладных расходов и др.

НИР и ОКР выполняются для обоснования решений, принимаемых при проектировании. Эти работы могут оплачиваться и по другим статьям. Следует иметь в виду, что определение стоимости разработки проекта в начальной стадии исследовательского проектирования может носить оценочный характер, так как на этом этапе разработки проекта отсутствует ряд данных, необходимых для точного определения стоимости, не установлен объем серий, на которую распределяется стоимость проектирования, и т. п.

Однако к формулам для определения стоимости проектирования предъявляются требования чувствительности к тактико-техническим характеристикам корабля и простоты вычисления.

В зависимости от стадии разработки проекта известны три уровня расчета стоимости проектирования:

— ориентировочный, в зависимости от массы корабля или ее составляющих или отношения стоимости (трудоемкости) к мас-

се, используемый при разработке технических решений и технико-экономического проекта;

— предварительный, основанный на статистических зависимостях стоимости от нагрузки масс или трудоемкости, используемый при разработке технических проектов;

— окончательный, основанный на калкуляционных данных для рабочего проекта и данных весового контроля сборочного проекта.

Для оценки стоимости проектирования в начальной стадии проектирования можно воспользоваться формулами:

$$C_{пр} = k_{пр} / (D); \quad (12.1)$$

$$C_{пр} = k'_{пр} \cdot C. \quad (12.2)$$

где  $k_{пр}$  и  $k'_{пр}$  — коэффициенты, учитывающие новизну и сложность разработки проекта; они определяются экспертным методом или по прототипу;  $f(D)$  — функция, определяемая в результате обработки статистических данных относительных кораблей;  $C$  — стоимость постройки головного корабля.

Закономерность изменения зависимости  $f(D)$  качественно может быть представлена на рис. 12.1 [11].



Рис. 12.1

Большое значение при оценке стоимости проектирования корабля имеют способы, в основу которых положена трудоемкость, определяемая по калкуляционным аналогам. Процесс определения трудоемкости заключается в тщательном подборе карточек-аналого, близкого к оцениваемой работе, по которой определяется трудоемкость. Затем, в результате сопоставления сложности аналога и оцениваемой работы определяются коэффициент относительной сложности в своей группе  $k_{от}$  и коэффициент сложности оцениваемой работы по отношению к аналогу  $k_{от}$ .

Используя полученные данные, трудоемкость оцениваемой работы можно определить по формуле

$$T_p = \tau_p k_{от} k_{пр}, \quad (12.3)$$

где  $\tau_p$  — трудоемкость, определяемая по калкуляционным аналогам.

При оценке трудоемкости разработки чертежей надо учитывать следующие коэффициенты [21]:

— новизны проекта  $k_{н.п} = 1.5 + 2.0$ ;

— полноты и глубины предварительных проработок  $k_{п.г} = 1.0 + 1.5$ ;

— наличия отработанных методов и нормативных материалов  $k_{н.м} = 1.1 + 1.3$ ;

— дополнительной трудоемкости в связи с отсутствием эффективных средств размножения  $k_{р} = 1.1 + 1.15$ .

Следует иметь в виду, что существенное влияние на стоимость создания корабля имеет объем проектной документации. При большом объеме трудоемкость проектных работ будет неоправданно велика, а недостаточный объем может привести к неоправданному росту трудоемкости постройки.

#### Проектирование стоимости постройки корабля. Способ определения стоимости постройки корабля на основе данных статистики

Для обеспечения простого и достаточно точного для исследовательского проектирования (при ограниченных исходных данных) определения стоимости постройки корабля может быть применен способ, основанный на данных статистики (прототипа). Стоимость работы по изготовлению, сборке, сварке, монтажу, а также стоимость готовых изделий, механизмов, устройств, систем и т. д. для каждого раздела нагрузки масс корабля с достаточной точностью может быть принята пропорциональной массе этих разделов. При этом коэффициент пропорциональности, представляющий стоимость одной тонны массы соответствующего раздела нагрузки корабля, может быть определен по калкуляции близкого прототипа или с помощью зависимости вида:

$$C_i = \frac{C_i^0}{P^b}, \quad (12.4)$$

где  $C_i^0, P_i^0$  — стоимость и масса  $i$ -го раздела нагрузки масс прототипа корабля;  $C_{10}$  — стоимость одной тонны  $k$ -го раздела нагрузки масс прототипа.

Таким образом, общая стоимость постройки головного корабля может быть представлена в виде

$$C_0 = C_{\text{КР}} + C_{\text{В}} + C_{\text{М}} + C_{\text{Э}} + C_{\text{С}} + C_{\text{У}} + C_{\text{З}} + C_{\text{П}}, \quad (12.5)$$

где  $C_{\text{КР}} = C_{\text{КР}} P_{\text{КР}}$  — стоимость корпуса;  $C_{\text{В}} = C_{\text{В}} P_{\text{В}}$  — стоимость вооружения;  $C_{\text{М}} = C_{\text{М}} P_{\text{М}}$  — стоимость механизмов;  $C_{\text{Э}} = C_{\text{Э}} P_{\text{Э}}$  — стоимость электрооборудования;  $C_{\text{С}} = C_{\text{С}} P_{\text{С}}$  — стоимость систем и устройств;  $C_{\text{У}} = C_{\text{У}} P_{\text{У}}$  — стоимость связи;  $C_{\text{З}} = C_{\text{З}} P_{\text{З}}$  — стоимость защиты;

Стоимость подготовительных, вспомогательных, дополнительных и других работ может быть принята в процентах от всей стоимости корабля, т. е.

$$C_{\text{П}} = K_{\text{П}}(C_{\text{КР}} + C_{\text{В}} + C_{\text{М}} + C_{\text{Э}} + C_{\text{С}} + C_{\text{У}} + C_{\text{З}}). \quad (12.6)$$

Стоимость вооружения  $C_{\text{В}}$  определяется суммированием стоимости всех типов вооружения, предусмотренного на корабле. Эти данные принимаются из смет кораблей-прототипов, обладающих подобным вооружением или по данным предприятий, создающих вооружение.

Следует иметь в виду, что стоимость переменных грузов (боезапас, топливо, сыпучая масса, провизия, личного состава и т. п.) в стоимости постройки корабля не учитывается. Стоимость этих грузов учитывается в стоимости содержания корабля. Если же в процессе исследовательского проектирования всесторонне исследуются, например, тип и состав вооружения, то тогда стоимость боезапаса включается в состав уравнения (12.5).

#### Способ определения стоимости постройки корабля по уравнениям нормативов масс и трудоемкости

В основе этого способа лежит предположение о том, что при подобных однотипных конструкциях стоимость их создания можно принять пропорциональной их массам.

Формула для определения стоимости постройки головного корабля определяется по калькуляционным статьям, соответ-

ствующим структуре себестоимости и может быть представлена в виде [38/]

$$C_1 = (1 + k_1)(C_{\text{РЗ}} + C_{\text{М}} + C_{\text{Э}} + C_{\text{С}}), \quad (12.7)$$

где  $k_1$  — коэффициент коммерческих расходов и плановых отчислений.

Рассмотрим способы определения составляющих  $C_{\text{РЗ}}$ ,  $C_{\text{М}}$ ,  $C_{\text{Э}}$ ,  $C_{\text{С}}$  зависимости (12.7).

а) Стоимость работ судостроительного завода

$$C_{\text{РЗ}} = (1 + k_2) \sum_{i=1}^n C_{\text{нн}} T_{\text{н}} = (1 + k_2) \sum_{i=1}^n [C_{\text{нн}} f_i(P_i)], \quad (12.8)$$

где  $k_2$  — коэффициент, учитывающий накладные расходы;  $C_{\text{нн}}$  — стоимость единицы нормо-часа,  $i = 1, \dots, n$ ;  $T_{\text{н}} = f_i(P_i)$  — трудоемкость по отдельным конструктивно-технологическим узлам;  $P_i, n$  — масса и число конструктивно-технологических узлов.

Если ввести среднюю стоимость нормо-часа по всем узлам для конкретного завода, то формулу можно упростить:

$$C_{\text{РЗ}} = (1 + k_2) C_{\text{н}} \sum_{i=1}^n f_i(P_i). \quad (12.9)$$

Для определения зависимости  $f_i(P_i)$  можно использовать статистическую обработку данных прототипов методом регрессионного анализа. Опыт показывает, что рассматриваемая зависимость, как правило, линейная:

$$f_i(P_i) = a_i P_i + b_i. \quad (12.10)$$

где  $a_i$  и  $b_i$  — статистические коэффициенты, зависящие от технических характеристик проекта, в частности, от материала корпуса, архитектуры, типа энергетической установки и т. д.

Если используется близкий прототип, то будет справедлива зависимость, связывающая удельные трудоемкости проекта и прототипа:

$$f_i = \frac{T_i}{P_i} = \frac{T_i^0}{P_i^0}.$$

В этом случае

$$C_{\text{св}} = (1+k_1) \sum_{i=1}^k C_{\text{мат}} f_i P_i, \quad (12.11)$$

б) Стоимость материала зависит от масс узлов корабля:

$$C_{\text{м}} = \sum_{i=1}^k C_{\text{мат}} P_i, \quad (12.12)$$

где  $C_{\text{мат}}$  — удельная стоимость материалов по  $i$ -му узлу.

в) Определение стоимости контрагентских поставок ( $C_{\text{к.п}}$ ) на стадии исследовательского проектирования связано с серьезными трудностями:

— обеспечение высокой точности оценки их стоимости, так как контрагентские поставки составляют существенную долю от стоимости постройки корабля, и любая неточность в расчете может привести к большим погрешностям окончательных результатов;

— учетом особенностей оценки контрагентских изделий, предоставляемых различными отраслями промышленности и имеющими свою специфику, усложняющую оценку их стоимости.

В связи с изложенным, стоимость оружия, радиоэлектронного вооружения, систем связи и навигации, информационно-управляющих систем и т. д. определяют по составу и типу вооружения с учетом их особенностей и данных контрагентов.

Для расчета стоимости энергетической и электроэнергетической систем и других контрагентских поставок можно использовать способ укрупненных массовых показателей с использованием удельных трудоемкостей конструктивно-технологических узлов отдельных изделий, а также данных стоимости нормо-часа на заводах-поставщиках. Для упрощения этого способа можно воспользоваться способом определения стоимости по массам конструктивно-технологических узлов или изделий без оценки трудоемкости. В этом случае

$$C_{\text{к.п}} = \sum_{j=1}^k C_j P_j, \quad (12.13)$$

где  $P_j$  — масса контрагентского изделия  $j$ -го типа;  $C_j$  — удельная стоимость (стоимость одной тонны массы) изделия  $j$ -го типа,

определяется по данным прототипа;  $k$  — число типов контрагентских изделий в этой группе контрагентских поставок.

г) Стоимость прочих прямых расходов ( $C_{\text{п.р}}$ ) может быть приближенно определена в зависимости от суммарной трудоемкости на основе статистических данных

$$C_{\text{п.р}} = k_{\text{п.р}} \sum_{i=1}^k T_{\text{г}} = k_{\text{п.р}} \sum_{i=1}^k f_i(P_i), \quad (12.14)$$

Учитывая изложенное выше, стоимость постройки головного корабля может быть выражена зависимою вида

$$C_{\text{г}} = (1+k_1)(1+k_2) \sum_{i=1}^k C_{\text{мат}}(kP_i) + \sum_{i=1}^k C_{\text{мат}} P_i + k_{\text{п.р}} \sum_{i=1}^k f_i(P_i) + \sum_{i=1}^k C_{\text{ж}} P_i + C_{\text{св}}, \quad (12.15)$$

Если воспользоваться средней стоимостью нормо-часа и удельными трудоемкостями, уравнение (12.15) можно представить в виде /381/

$$C_{\text{г}} = (1+k_1)(1+k_2) C_{\text{м}} + k_{\text{п.р}} \sum_{i=1}^k f_i P_i + \sum_{i=1}^k C_{\text{мат}} P_i + \sum_{i=1}^k C_j P_i \} D + (1+k_1) C_{\text{св}}, \quad (12.16)$$

где  $D$  — водоизмещение корабля;  $C_{\text{св}}$  — стоимость вооружения корабля;  $P_i$  — относительные массы конструктивно-технологических узлов,

$$P_i = \frac{P_i}{D}.$$

Для подобных кораблей величины, входящие в фигурные скобки /381/, можно считать примерно одинаковыми. В этом случае приближенную формулу для оценки стоимости постройки головного корабля можно привести к виду

$$C_{\text{г}} = C_{\text{г}} D + (1+k_1) C_{\text{св}}, \quad (12.17)$$

где  $C_{\text{г}}$  — стоимость всех затрат, приходящихся на 1 т водоизмещения, за исключением затрат на вооружение, определяемых по прототипу.

Можно добиться некоторого уточнения первого члена, стоящего в правой части формулы (12.17), разбив его на две основные составляющие части: стоимость затрат на изготовление корпуса с оборудованием и стоимость энергетической установки. В этом случае вместо (12.17) получим

$$C_i = (C_{\text{к}} p_{\text{к}} + C_{\text{у}} p_{\text{у}}) D + (1 + k) C_{\text{ср}},$$

где  $p_{\text{к}}$ ,  $p_{\text{у}}$  — относительные массы корпуса с оборудованием и энергетической установкой соответственно;  $C_{\text{к}}$ ,  $C_{\text{у}}$  — удельные стоимости на единицу массы корпуса с оборудованием и энергетической установкой соответственно.

Известно, что стоимость постройки серийных кораблей зависит от порядкового номера корабля в серии. Снижение стоимости постройки серийных кораблей связано с накоплением опыта постройки от головного корабля к серийным, совершенствованием технологии постройки, повышением эффективности использования оборудования и др. Эти же причины имеют отношение к снижению стоимости контрагентских поставок.

Стоимость постройки  $i$ -го корабля серии в зависимости от стоимости головного корабля в общем виде может быть представлена зависимостью

$$C_{i1} = \varphi(i) C_1. \quad (12.18)$$

Значение  $\varphi(i)$  зависит от порядкового номера корабля в серии. Например, для головного корабля, т. е. при  $i = 1$ ,  $\varphi(i)$  должна принимать максимальное значение равное 1, а при  $i \rightarrow \infty$  она должна убывать, стремиться к некоторому пределу, т. е. получать постоянное значение, соответствующее определенной установленной стоимости постройки серийного корабля.

Устанавливаемая стоимость постройки серийного корабля зависит от особенностей судостроительных заводов и их контрагентов, новизны, типа и класса создаваемых кораблей и т. п. В связи с тем, что при исследовательском проектировании указанные выше факторы, от которых зависит стоимость постройки корабля, установить трудно, можно использовать зависимость, предложенную Л. Ю. Худжовым [381].

$$\varphi(i) = \left( b + \frac{a}{i} \right), \quad (12.19)$$

где  $a$  и  $b$  — величины, определяемые статистическим путем. Из (12.19) можно получить

$$\frac{C_{\text{ср}}}{C_{\text{с1}}} = \frac{1}{a+b} \left( b + \frac{a}{i} \right). \quad (12.20)$$

Используя (12.20), можно определить установившееся значение стоимости серийного корабля  $C_{\text{сн}}$

$$C_{\text{сн}} = C_{\text{с1}} \left( \frac{b}{a+b} \right). \quad (12.21)$$

Если при этом принять, что  $C_i = C_{\text{с1}}$ , то (12.21) примет вид

$$C_{\text{сн}} = b C_i. \quad (12.22)$$

Для оценки стоимости постройки  $N$  кораблей можно применить формулу

$$C_{\text{с}}(N) = C_i \sum_{i=1}^N \varphi(i). \quad (12.23)$$

Формулы (12.18)–(12.23) предполагают оценку стоимости каждого корабля в сопоставимых ценах и не учитывают инфляционно (удорожание) в процессе строительства кораблей серии.

## 12.2. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТОИМОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ И УТИЛИЗАЦИИ

Стоимость содержания корабля в составе флота складывается из стоимости эксплуатации и базирования.

### Стоимость эксплуатации корабля

- К стоимости эксплуатации корабля относят:
- стоимость ремонтов с плановой заменой оборудования  $C_{\text{рем}}$ ;
  - стоимость материально-технического обеспечения  $C_{\text{мт}}$ , т. е. горючесмазочных материалов, снабжения и т. п.;
  - стоимость содержания личного состава  $C_{\text{лс}}$ .

К стоимости базирования корабля можно отнести:

— стоимость создания и содержания средств базового обеспечения;

— стоимость подготовки кадров, содержание аппарата организации и управления базирования и т. п.

Затраты на содержание корабля имеют исключительное значение для оценки его эффективности.

Стоимость содержания корабля может быть оценена:

— прямым путем, т. е. по статьям сметы;

— приближенно нормативно-параметрическим путем с использованием зависимостей статей расходов от основных тактико-технических характеристик корабля, т. е. водоизмещения, мощности энергетической установки, численности личного состава и т. д.

Для оценки стоимости эксплуатации корабля, как правило, используют ее среднегодовую стоимость. Для расчета стоимости эксплуатации разрабатывается график использования корабля между заводскими ремонтами (рис. 12.2).

Следует иметь в виду, что для кораблей с ядерными энергетическими установками надо учитывать возможность совмещения переработки активных зон реакторов с заводскими ремонтами.



Рис. 12.2

В общем виде стоимость эксплуатации

$$C_{\text{эксп}} = C_{\text{созд}} + C_{\text{сод}} + C_{\text{рем}} \quad (12.24)$$

или среднегодовая стоимость эксплуатации

$$C_{\text{ср}} = \frac{\left(\frac{R}{A} - 1\right) C_{\text{сод}} + C_{\text{созд}} + \frac{R}{A} C_{\text{рем}}}{R + \left(\frac{R}{A} - 1\right) T_{\text{рем}} + T_{\text{мод}}} + C_{\text{рем}} R_{\text{рем}} \quad (12.25)$$

где  $R$  — ресурс основного оборудования корабля до заводского ремонта;  $A$  — автономность корабля;  $C_{\text{сод}}^1$  — стоимость одного межпоходового ремонта;  $C_{\text{рем}}^1$  — стоимость одного заводского ремонта;  $T_{\text{мод}}$  — время межпоходового ремонта;  $T_{\text{рем}}$  — время заводского ремонта;  $C_{\text{сод}}^2$  — стоимость материально-технического обеспечения для одного похода;  $C_{\text{рем}}^2$  — среднегодовая стоимость содержания одного человека экипажа;  $n_{\text{рем}}$  — численность экипажа.

К недостаткам этой формулы следует отнести:

— сложность выражения входящих в нее зависимостей через тактико-технические характеристики корабля на начальной стадии проектирования;

— сложность учета физического и морального износа боевых и технических средств при оценке стоимости годовой эксплуатации в последующие периоды службы корабля и т. п.

Поэтому для приближенной оценки годовой стоимости эксплуатации корабля выражается в процентах от стоимости его постройки. При этом учитываются амортизационные отчисления, стоимость текущих и средних ремонтов, расхода на материально-техническое обеспечение (кроме топлива).

В отличие от перечисленных выше косвенных расходов, т. е. общие эксплуатационные, административно-технические и пр., принимаются в процентах от стоимости содержания экипажа. В этом случае для приближенной оценки стоимости эксплуатации можно воспользоваться формулой

$$C_{\text{эксп}} = K \cdot C_{\text{э}} \quad (12.26)$$

где  $K$  — коэффициент, определяемый по протоколу.

Следует отметить, что для упрощения оценки стоимости эксплуатации корабля стоимость постройки может быть принята пропорциональной водоизмещению корабля.

Для определения среднегодовой стоимости эксплуатации корабля можно воспользоваться следующими приближенными формулами.

1. Среднегодовая стоимость заводских ремонтов корабля.

В связи с тем, что стоимость ремонта корабля является существенной составляющей стоимости эксплуатации, целесообразно ее рассматривать по укрупненным калькуляционным ставкам:

а) стоимость контрактных поставок

$$C_{k,1} = k_{k,1}(C_{k,1}P_{c1} + C_{k,1}P_{m1} + C_{k,1}P_{r1} + \dots) = k_{k,1} \sum C_{k,i}P_{i1} \quad (12.27)$$

где  $k_{k,1}$  — коэффициент, определяемый по близкому прототипу;  $P_i$  — массы разделов нагрузки, поставленных контрагентами;  $C_{k,i}$  — стоимость 1 т разделов нагрузки, поставленных контрагентами, или

$$C_{k,i} = K'_{k,i} D,$$

где  $K'_{k,i}$  — определяется по прототипу;

б) затраты на материалы, изделия и др., расходуемые на ремонт:

$$C_k = k_k C_{m,0} D, \quad (12.28)$$

где  $C_{m,0}$  — стоимость 1 т материалов;  $D$  — водоизмещение корабля;

в) стоимость содержания личного состава корабля:

$$C_{l,0} = C_{l,0} + C_{l,1} + C_{l,2}, \quad (12.29)$$

где  $k_{l,0}, k_{l,1}, k_{l,2}$  — количество офицеров, старшин и матросов соответственно;  $C_{l,0}, C_{l,1}, C_{l,2}$  — среднегодовая стоимость содержания офицеров, старшин и матросов соответственно;

г) прочие прямые расходы:

$$C_{p,0} = C_{p,0} D, \quad (12.30)$$

где  $C_{p,0}$  — стоимость прочих прямых расходов на 1 т водоизмещения корабля;

д) накладные расходы

$$C_{n,0} = C_{n,0}^* + C_{n,0}^1, \quad (12.31)$$

где  $C_{n,0}^*$ ,  $C_{n,0}^1$  — полные и заводские накладные расходы.

Таким образом, среднегодовая стоимость заводских ремонтов корабля составит

$$C_{r,0} = \frac{C_{k,0} + C_k + C_{l,0} + C_{p,0} + C_{n,0}}{T_0} \quad (12.32)$$

2. Стоимость материально-технического обеспечения состоит из горючесмазочных материалов (ГСМ) и стоимости снабжения.

Стоимость годового расхода ГСМ складывается из стоимости годовного расхода топлива  $C_{т0}$  и смазочного масла  $C_{м0}$ :

а) стоимость топлива

$$C_{т0} = k_{т0} \tau \text{ КОИ } C_{т0}^* q_{т0} N_{т0}, \quad (12.33)$$

б) стоимость смазочного масла

$$C_{м0} = k_{м0} \tau \text{ КОИ } C_{м0}^* q_{м0} N_{м0}, \quad (12.34)$$

где  $k_{т0}, k_{м0}$  — поправочные коэффициенты, определяемые по близкому прототипу;  $\tau$  — количество часов в году; КОИ — коэффициент оперативного напряжения — это отношение времени нахождения корабля в море к суммарному времени нахождения его в море и базе;  $C_{т0}^*, C_{м0}^*$  — стоимость одной тонны топлива и смазочного масла;  $q_{т0}, q_{м0}$  — удельные расходы топлива и масла, кг. с.ч.  $N_{т0}, N_{м0}$  — мощность энергетической установки, л. с.

в) стоимость снабжения за весь период жизненного цикла корабля

$$\left. \begin{aligned} C_{с0} &= k_{с0} C_{с0} \\ C_{с0} &= k_{с0}' D \end{aligned} \right\} \quad (12.35)$$

где  $k_{с0}, k_{с0}'$  — доли стоимости снабжения от стоимости постройки и водоизмещения корабля соответственно, определяются по прототипу.

Таким образом, ежегодная стоимость материально-технического обеспечения может быть определена по формуле

$$C_{мт0} = C_{т0} + C_{м0} + \frac{C_{с0}}{T_0} \quad (12.36)$$



### Стоимость утилизации кораблей

В настоящее время в связи со значительным сокращением Вооруженных Сил перед проектными организациями и промышленностью особенно остро ставятся вопросы, связанные с утилизацией вооружения в военной технике (В и ВТ).

"Утилизация" (от латинского "utilis" полезный) — использование с пользой в народном хозяйстве вторичных ресурсов, получаемых в результате разделки (демонтировки) образцов В и ВТ, выходящих установленные сроки или сокращаемых в соответствии с международными обязательствами.

Основной целью утилизации является обеспечение максимально возможного возврата высвобождаемых ресурсов в народное хозяйство страны с использованием экологически чистых и высокоэффективных технологий утилизации и переработки В и ВТ в товары народного потребления, гражданскую продукцию или конструкционные материалы.

Проведение утилизации В и ВТ требует солидной научной базы, проведения специальных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, т. е. диктует необходимость вложения определенного объема ресурсов.

Экономическая эффективность процесса утилизации В и ВТ представляет собой разницу между объемами ресурсов, получаемых от реализации продуктов утилизации В и ВТ и объемами ресурсов, затрачиваемых на ее проведение.

Утилизация В и ВТ ВМФ включает:

— утилизацию корпусов боевых кораблей и вспомогательных судов ВМФ;

— утилизацию боеприпасов и оружия кораблей, самолетов и береговых комплексов ВМФ;

— утилизацию РЭВ, в том числе снимаемого с кораблей при их выводе из боевого состава;

— утилизацию летательных аппаратов и средств их наземного обеспечения;

— утилизацию средств плавного, технического и других видов обеспечения ВМФ.

Продуктами утилизации В и ВТ ВМФ являются:

— лом черных, цветных и драгоценных металлов;

— техника и комплектующие элементы, находящимся применению в народном хозяйстве или вышедшие опрос на внутреннем и внешнем рынках.

Отдельным результатом утилизации В и ВТ может рассматриваться реализация ряда комплексов или систем вооружения с доработкой до требований заказчика на внешнем рынке.

По завершении службы корабля в составе флота он подлежит утилизации. Затраты на утилизацию складываются из затрат на содержание корабля в период подготовки и проведения утилизационных работ, затрат на его транспортировку к месту утилизации (продажи) и собственно затрат на выполнение работ по утилизации (разделке, сортировке, пакетированию, хранению и транспортировке к месту реализации).

Затраты на утилизацию должны учитываться при создании корабля и компенсируются его остаточной стоимостью. В свою очередь, остаточная стоимость корабля на момент завершения им службы складывается из стоимости металлолома, выручки от реализации комплектующего оборудования или от продажи корабля в целом. При правильной организации работ утилизатора корабля не должна быть убыточной, т. е. должно выполняться условие

$$C_{\text{У}} \leq C_{\text{ост}}(T_{\text{У}}), \quad (11.37)$$

где  $C_{\text{У}}$  — стоимость утилизации;  $C_{\text{ост}}(T_{\text{У}})$  — остаточная стоимость корабля на момент вывода его из состава ВМФ.

Если приведенное выше условие не будет выполняться, то потребуются дополнительные затраты. В противном случае встает вопрос о возможном экологическом ущербе, который может быть нанесен природе присутствием в зонах ответственности флота затопленных кораблей.

Особое место в проблеме утилизации занимает вопрос утилизации кораблей с ядерными энергетическими установками. Его особенность заключается в том, что:

— утилизация кораблей с АЭУ не может быть рентабельной, т. е. носит заведомо затратный характер;

— проблема утилизации АЭУ выводит за рамки ВМФ и является общегосударственной проблемой, требующей для своего

решения специально выделенных средств и привлечении специализированных предприятий, оборудования и технологий;

— вопрос экологической безопасности выводимых из состава флота кораблей с АЗУ контролируется международными организациями и подпадает под действие международных соглашений.

В настоящее время проблема утилизации кораблей с АЗУ входит свое решение в рамках федеральной целевой программы.

В заключительные изложения подходов к построению модели оценки стоимостей создания и содержания кораблей в составе ВМФ, необходимо остановиться на таком важном для современного состояния экономики производстве вопросе, как привлечение одновременных затрат к одному моменту времени.

Воспитно-экономический анализ при исследовательском проектировании связан с необходимостью исследования корабля от начала его создания до окончания из состава ВМФ с учетом долгосрочного проектирования. При этом на начальной стадии проектирования в большом объеме используются данные прототипов и статистические данные прошедшего времени, которые расширяют время, подлежащее исследованию. В настоящее время, в период бурного развития технической революции, корабельщиками разработаны дорогостоящими системами оружия, вооружения, энергетическими установками и специальными системами, резко отличающиеся по стоимости от кораблей прошлого и будущего.

Изменение стоимости создания и содержания кораблей ВМФ с течением времени связано с такими факторами, как:

- постоянное повышение боееспособности кораблей;
- непрерывный рост производительности труда;
- изменение конъюнктуры, инфляция и т. д.

Влияние перечисленных общих факторов на экономику страны может быть учтено с помощью индексов цен на промышленную продукцию.

Индексами цен в статистике называются относительные величины, характеризующие суммарную динамику всех факторов, входящих, в частности, на цены продукции промышленного производства.

Для сравнения стоимости кораблей с различными годами постройки надо фактическую их стоимость в текущих ценах привести к стоимости базисного года, относительная которого принята индексом цен, путем деления на соответствующий индекс.

Обозначим  $I_{i/t_0}$  индекс цен в момент  $t$ , по отношению к ценам в момент  $t_0$ , принятый за базисный год. Тогда текущие стоимости могут быть приведены к сопоставимому виду с базисными формулой

$$C_t = \frac{C_t}{I_{i/t_0}} \quad (12.18)$$

Прогнозирование индексов цен на планируемый период и правильный их учет за прошедший интервал времени, представляет собой самостоятельную проблему современной экономики, в частности, ценообразования, выходящую за рамки теории проектирования корабля.

### 12.3. ОЦЕНКА СТОИМОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Оценка боевой эффективности проектируемого корабля производится на фоне проводимой операции сил флота. Для ряда задач исследовательского проектирования, когда необходимо учесть влияние на то или иное проектное решение величины объема серии строящихся кораблей, их взаимодействие и т. п., нередко используют такое понятие, как однородный наряд сил. Под таким нарядом понимается состав сил операции, представленной только кораблями строящейся серии.

При реализации изложенного подхода одновременно возникает потребность в определении стоимости создания и содержания однородного наряда. Тогда, сопоставляя эффективность действия сил в операции и стоимость привлекаемого в эту операцию наряда сил, можно поставить вопрос об определении стоимости решения боевой задачи.

Суммарная стоимость создания и содержания наряда кораблей может быть представлена в виде /381/

$$C_{\Sigma}(N, T_{\Sigma}) = C_{\Sigma}(N) + C_{\text{эксп}}(N, T_{\Sigma}) + C_{\text{баз}}(N, T_{\Sigma}), \quad (12.39)$$

где  $C_{\Sigma}(N)$  — стоимость создания наряда кораблей (см. (12.23)),

$$C_{\Sigma}(N) = C_{\Sigma} \sum_{i=1}^N (\varphi_i); \quad (12.40)$$

$C_{\text{эксп}}(N, T_{\Sigma})$  — стоимость эксплуатации наряда кораблей может быть определена по выражениям (12.24—12.36) за все время эксплуатации  $T_{\Sigma}$  наряда  $N$ . Например,

$$C_{\text{эксп}}(N, T_{\Sigma}) = K_{\Sigma} C_{\Sigma} N T_{\Sigma}. \quad (12.41)$$

$C_{\text{баз}}$  — стоимость базирования наряда кораблей

$$C_{\text{баз}} = K_{\text{баз}} C_{\Sigma}(N, T_{\Sigma}). \quad (12.42)$$

Следует отметить, что стоимость создания и содержания наряда кораблей является достаточным экономическим показателем, если при оценке эффективности учитывается весь перечень задач, выполняемых кораблем за весь период его службы, с анализом и учетом потери кораблей и стоимости этих потерь.

Для расчета стоимости потерь можно применить математическое ожидание стоимости потерь для однородного наряда:

$$C_{\text{пот}}(N) = \sum_{i=1}^N C_{\text{ост}}(\varphi_i) p_i(N), \quad (12.43)$$

где  $C_{\text{ост}}(\varphi_i)$  — остаточная стоимость  $i$ -го корабля на момент времени  $t$  окончания операции;  $p_i(N)$  — вероятность гибели  $i$ -го корабля наряда.

Если принять, что вероятность гибели каждого корабля и остаточные стоимости их равны, то можно получить зависимость вида

$$C_{\text{пот}}(N) = C_{\text{ост}}(\varphi_i) N_{\text{ост}}(N), \quad (12.44)$$

где  $N_{\text{ост}}(N)$  — среднее число потриванных кораблей наряда.

Для приближенного определения остаточной стоимости можно принять, что остаточная стоимость имеет линейную зависимость от времени эксплуатации корабля, начиная от стоимости постройки и до  $t = T_{\Sigma}$ , т. е. до нуля. В этом случае остаточной стоимостью корабля, прослужившего полный срок службы, пре-

небрегают и исключают ее из рассмотрения. Эта зависимость может быть представлена в виде

$$C_{\text{ост}}(\varphi_i) = C_{\Sigma} \left( 1 - \frac{t}{T_{\Sigma}} \right), \quad (12.45)$$

где  $C_{\Sigma}$  — стоимость постройки корабля.

На этом основании формулу (12.44) можно представить в виде

$$C_{\text{пот}}(N) = C_{\Sigma} \left( 1 - \frac{t}{T_{\Sigma}} \right) N_{\text{ост}}(N). \quad (12.46)$$

При многоразовом боевом использовании кораблей для экономической оценки используется понятие стоимости решения задачи с учетом стоимости потерь, стоимости эксплуатации за время проведения операции, стоимости израсходованного боезапаса и изменения остаточной стоимости за время операции и амортизационных отчислений. Стоимость решения поставленной задачи можно представить в виде

$$C_{\Sigma}(N) = C_{\Sigma} \left( 1 - \frac{t}{T_{\Sigma}} \right) N_{\text{ост}}(N) + C_{\text{эксп}}(N, T_{\Sigma}) \frac{t}{T_{\Sigma}} + \\ + C_{\Sigma} \frac{t}{T_{\Sigma}} [N - N_{\text{ост}}(N)] + C_{\text{бз}}, \quad (12.47)$$

где  $t$  — продолжительность операции;  $C_{\text{бз}}$  — стоимость израсходованного боезапаса;  $N$  — наряд кораблей, участвующий в решении поставленной боевой задачи с заданной эффективностью.

Следует отметить, что уточнение вычисления остаточной стоимости является сложной задачей, зависящей от морального и физического старения корабля в исследуемый момент времени. Некоторые соображения о вычислении остаточной стоимости с учетом морального и физического старения изложены в книге Л. Ю. Худякова [38].

# Глава 13. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ОЦЕНКИ БОЕВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТИРУЕМЫХ НАДВОДНЫХ КОРАБЛЕЙ

## 13.1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ БОЕВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Оценка боевой эффективности действий корабля является важным этапом на всех стадиях его создания, включая этап, связанный с оптимизацией действий проектируемого корабля в составе сил флота.

Боевая эффективность является одним из наиболее значимых комплексных свойств корабля. Важнейшая ее особенность заключается в том, что понятие эффективности неразрывно связано с эффективностью операции, участие в которой принимает проектируемый корабль, и может выражаться только через нее. Эффективность же операции, как качественная категория, отражает степень достижения целей, поставленных на эту операцию, и зависит от состояния морской среды и ее участников, в том числе, проектируемого корабля.

В качестве количественной оценки боевой эффективности корабля в теории боевой эффективности рассматривается так называемый показатель эффективности, который представляет собой количественную меру способности корабля решать свои стоящие ему боевые задачи. Поскольку, как уже отмечалось, боевая эффективность корабля может рассматриваться только в контексте с эффективностью операции, функция показателя эффективности, помимо ГТХ самого корабля, в качестве его аргументов должна включать также характеристики других наших сил и средств, предполагаемого противника и параметры внешней среды.

Основой принципа выбора показателя эффективности является его строгое соответствие цели операции, которая должна быть достигнута в результате выполнения задачи. Таким образом, показатель эффективности должен быть мерой успешности выполнения задачи и являться в то же время представительной характеристикой боевых свойств проектируемого корабля.

Если введено проектируемого корабля в состав наших сил, участвующих в операции, несущественно повлияет на ее эффек-

тивность, то, очевидно, представительность показателя эффективности обеспечить не удастся. Поэтому в задачах исследовательского проектирования, как правило, рассматриваются либо действия одиночного корабля, либо, если это невозможно — однородных парков сил. Действия разнородных сил с участием проектируемого корабля моделируются только в специальных случаях, когда в центре внимания исследователя оказываются вопросы взаимодействия проектируемого корабля с другими разнородными силами.

Принципиально можно различать два типа математических моделей оценки боевой эффективности. Первый тип — это модели оценки эффективности, связанные с оптимизацией действий уже созданного корабля в составе сил флота и применения его оружия. В этих моделях уже известны боевые возможности корабля, состав и расположение оружия и вооружения, количество имеющегося боезапаса и т. д. Такие модели, как правило, достаточно сложны и насыщены в оперативно-тактическом отношении. Они чаще всего являются имитационными и используются специалистами в области тактики и вооружения.

К другому типу моделей оценки боевой эффективности относятся модели, предназначенные для определения количества и качества оружия и вооружения при оптимизации тактико-технических характеристик корабля на ранних стадиях его проектирования. Именно такой тип моделей оценки боевой эффективности корабля используется в исследовательском проектировании в рамках оперативно-тактического блока математической модели корабля.

Далее будут рассматриваться основные подходы к созданию именно этого типа моделей. То, что в процессе решения задачи оптимизации ГТХ корабля происходит генерирование весьма значительного количества альтернативных вариантов, которые обмениваются друг от друга прежде всего составом оружия и боезапаса накладывает дополнительные требования к разрабатываемым моделям оценки эффективности в исследовательском проектировании корабля. Одной из основных проблем оценки эффективности является установление вида показателей эффек-

тивности создаваемого корабля, использование его в модели, а также применение методов расчета этих показателей.

Важным требованием к формированию показателя эффективности является необходимость количественно отражать именно тот параметр эффективности, который действительно отвечает целям исследования. По этой причине должны анализироваться класс, назначение корабля, решаемые им задачи, тип и характеристики объектов противостоящего противника, условия "спланирования" действия корабля при создании модели функционирования.

В том случае, когда показатель эффективности принимается в виде непрерывной случайной величины [38], его представляется представлять в виде:

$$E = \int u(y) dF(y, z), \quad (13.1)$$

где  $u(y)$  — так называемая функция полезности, которую можно рассматривать как количественную характеристику, связанную между собой величиной воздействия на объект  $y$  и результатом от этого воздействия  $u(y)$ . В задачах по оценке эффективности оружия  $u(y)$  можно рассматривать как меру ущерба, который наносится объекту удара при попадании в него  $y$  средств поражения;  $F(y, z)$  — функция распределения случайной величины, которая может принимать значения  $y$ ;  $z$  — совокупность варьируемых переменных проектируемого корабля;  $z$  — совокупность переменных, характеризующих условия среды (природные условия, противодействие противника и т. п.).

Для дискретной случайной величины показатель эффективности может быть записан в виде

$$E = \sum_{y=0}^{\infty} u(y) P_{xy}, \quad (13.2)$$

где  $P_{xy}$  — вероятность появления случайной величины  $y$  из  $n$  возможных значений (вероятность попадания  $y$  снарядов из  $n$  выстрелов).

В [38] рассмотрены четыре вида неубывающих функций полезности: линейная, ступенчатая, а также два вида линейной с насыщением (рис. 13.1).

Для линейной функции полезности (рис. 13.1, а)

$$u(y) = ky, \quad (13.3)$$

$$E = k \int_0^{\infty} y dF(y, z) = kE_0(x, z) \quad (13.4)$$

показатель эффективности представляет собой математическое ожидание  $kE_0$  случайной величины  $\eta$ . Такой вид функции полезности на практике можно интерпретировать, когда объект поражения может выдержать большое количество попаданий. Тогда,  $k\eta$  — число пораженных элементов объекта, а величина  $E = kE_0$  может рассматриваться как мера ущерба, наносимого противнику.

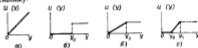


Рис. 13.1

Для ступенчатой функции полезности (рис. 13.1, б)

$$u(y) = \begin{cases} 0 & \text{при } y < y_0; \\ 1 & \text{при } y > y_0; \end{cases} \quad (13.5)$$

$$E = \int_0^{\infty} u(y) dF(y) \quad (13.6)$$

показателем эффективности является вероятность того, что случайная величина  $\eta$  примет любое из значений, большее или равное  $y_0$ . На практике этот случай имеет место, когда величина воздействия велика по сравнению с защищенностью объекта (попадание торпеды в корабль небольшого водоизмещения).

Для линейной функции полезности с насыщением (рис. 13.1, в)

$$u(y) = \begin{cases} 0 & \text{при } y \leq 0; \\ y/y_0 & \text{при } 0 < y \leq y_0; \\ 1 & \text{при } y > y_0; \end{cases} \quad (13.7)$$

$$E = E_0 \cdot \lambda_1 P\{\eta \leq \lambda_1\} + P\{\eta > \lambda_1\}, \quad (13.8)$$

где  $E_0$  — условное математическое ожидание величины  $\eta$  при условии  $\eta \leq \lambda_1$ .

Для линейной функции полезности с замкнутой ростом и убыванием

$$u(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq x_0; \\ \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} & \text{при } x_0 < x \leq x_1; \\ 1 & \text{при } x > x_1. \end{cases} \quad (13.9)$$

$$E = \frac{x_1 - x_0}{x_1 - x_0} P\{x_0 < \eta \leq x_1\} + P\{\eta > x_1\}. \quad (13.10)$$

На практике исследовать не всегда точно может представить себе допущение о том, что функция полезности является линейной или ступенчатой. Кроме того, рассмотрены случаи вида функций полезности и соответствующих показателей эффективности являются типичными по содержанию, однако не исчерпывают всего их возможного многообразия. По этим причинам наиболее часто в исследованиях в качестве показателей эффективности принимаю вероятность решения задачи, математическое ожидание некоторой случайной величины или вероятность того, что случайная величина примет значение не менее заданного.

Кроме требования быть количественной мерой соответствия результатов операции поставленным целям, показатели эффективности должны удовлетворять ряду общих требований. Основными из них [381] являются:

- критичность по отношению к исследуемым характеристикам и параметрам корабля, приемлем его использование;
- вычислимость, и в возможной степени простота и наглядность, позволяющая учесть факторов, существенно влияющих на процесс функционирования корабля.

Процесс разработки математических моделей оценки эффективности корабля может быть условно разделен на ряд этапов [1]:

— оперативно-тактическое описание модели и постановка задачи;

— разработка логической схемы и обоснование математических методов;

— разработка алгоритмов и программ модели.

На первом этапе формулируются цели и назначение модели, определяются объекты, участвующие в боевых действиях, разрабатываются схематичные боевые действия.

Сценарий является неформализованным структурным описанием боевых действий, отражающим участие в них исследуемых сил с представлением принципов и последовательности выполняемых действий с учетом противодействия противоположного противника. Важно, чтобы в сценарии имелся "эффект прояснения" всех анализируемых элементов объекта исследования.

На втором этапе разработки модели оценки эффективности производится выбор математического метода решения задачи, обоснование и выбор приемлемых допущений и ограничений, математических зависимостей, оцениваемых действие корабля на этапах его функционирования, а также формируется тип показателя эффективности.

На завершающем этапе разработки модели производится математическое моделирование всех зависимостей оперативно-тактического блока, разработка алгоритмов задачи, программы расчетов, производится проверка работоспособности модели и программы.

При оценке боевой эффективности необходимый уровень показателей эффективности решения задач, стоящих перед теми или иными силами и средствами, может задаваться с помощью специально разрабатываемых в тактике ВМФ нормативов. Однако в исследовательском проектировании в силу его специфики как ранней стадии проектирования и высокой степени неопределенности по параметрам противника, использование данной системы нормативов имеет ограниченный характер. Применять такие нормативы следует достаточно осторожно. Современный корабль создается в течение 10—12 лет, служить в составе флота он должен еще около 25 лет. За это время часто происходят колоссальные изменения в развитии оружия и вооружения, меняются

тактические приемы применения сил, использованная армия. Поэтому при проведении последовательского проектирования оценка боевой эффективности должна быть ориентирована на выбор оптимального варианта корабля из возможных альтернатив, а не на безусловное выполнение задаваемого норматива в принятых условиях обстановки.

Оценка боевой эффективности такой сложной многоцелевой системы, как корабль, требует выполнения расчетов количественных характеристик эффективности подсистем и учета вклада различных свойств корабля при получении общего показателя его эффективности.

Для количественной оценки вклада тех или иных свойств необходимо связать их с частными показателями эффективности и определить место этих показателей при формировании показателя эффективности корабля в целом. В первую очередь боевые качества корабля определяют его боеспособность.

Под боеспособностью понимается способность корабля выполнять возложенные на него боевые функции в заданных районах боевых действий и в заданные промежутки времени. Боеспособность обеспечивается наличием у корабля совокупности необходимых для этого комплексных свойств: ударных, боевой устойчивости, жевратационных. Можно говорить о показателе боевой эффективности как о мере боеспособности корабля.

Необходимость получения частных показателей, связанных с тем или иным свойством, определяется конкретными целями и задачами проводимого исследования.

При разработке математической модели оценки эффективности корабля принимаются основные допущения, определяющие порядок его использования и позволяющие выбрать необходимый для расчетов математический аппарат.

В качестве одного из таких допущений принимается гипотеза о том, что процесс функционирования корабля в мирное и военное время может быть условно разбит на ряд этапов:

- разворачивание, переход в районы боевых действий;
- преодоление противодействия сил противника;
- поиск сил противника или наведение на них;
- слежение за силами противника;

— решение задач в мирное и военное время (например, нанесение ударов по силам противника или обеспечение других кораблей в соответствии с предназначением рассматриваемого корабля);

- возвращение к месту базирования;
- восстановление боеспособности.

Эта гипотеза позволяет для математического описания основных этапов использовать различный математический аппарат. Например, теорию марковских процессов и последовательностей, теорию массового обслуживания, методы теории вероятностей и т. д.

Большое значение и частое применение имеет теория марковских процессов. Она получила название по имени русского математика А. А. Маркова (1856—1922 гг.). Основным допущением теории, позволяющим математически описывать процесс функционирования корабля, является предположение о том, что состояние системы на каждом из последующих этапов функционирования не зависит от состояния системы на предыдущих этапах и определяется на каждом этапе самостоятельно. Таким образом, сложный процесс функционирования делится на ряд простых независимых событий (этапов), успешность функционирования на каждом из них зависит от возможностей системы и воздействия на нее внешней среды. По результатам действия системы на каждом из этапов путем построения так называемой "марковской цепи" определяется успешность функционирования во всем процессе в целом. Данное допущение является довольно жестким, однако практика исследований подтвердила, что оно может успешно применяться при оценке эффективности вариантов создаваемого корабля.

Широкое распространение, особенно при оценке эффективности вооружения корабля, при оптимизации действий сил или использования оружия, а также при оценке эффективности систем обеспечения, получили так называемые системы массового обслуживания. Такие системы имеют несколько линий или каналов обслуживания, на которые попадают заявки на обслуживание. В результате анализа состояния системы происходит распределение заявок по свободным каналам. Если все каналы об-

служивания заняты, то заявка либо получает отказ в обслуживании, либо ожидает, когда освободится один из каналов. Одной из основных характеристик такой системы является время обслуживания каждой заявки.

Задача теории массового обслуживания состоит в том, чтобы оценить эффективность системы и дать рекомендации для лучшей организации ее работы.

В процессе оценки боевой эффективности большое место занимает определение вероятности поражения цели, которая, в свою очередь, зависит от вероятности попадания средств поражения в цель и возможности цели продолжать свое функционирование в условиях поражения, т. е. живучести цели.

Для определения полной вероятности поражения цели для дискретного случая может быть использована формула, впервые предложенная академиком А. Н. Колмогоровым

$$P(m) = \sum_{k=0}^m G(k) P_{k,m}, \quad (13.11)$$

где  $G(k)$  — условная вероятность поражения цели при  $k$  попаданиях;  $P_{k,m}$  — вероятность попадания в цель ровно  $m$  средств поражения при  $k$  произвольных выстрелах.

Вероятности попадания в цель определяются различными и достаточной мере разработанными способами, которые выбираются исходя из степени зависимости выстрелов между собой. Наиболее часто в практике оценки эффективности на этапе последовательного проектирования используется понятие вероятности попадания ( $q$ ) при одном выстреле или за одну стрельбу, в которую входит несколько выстрелов, в случае, когда они имеют независимый характер. Тогда вероятность получения хотя бы одного попадания при одинаковых и различных вероятностях попадания могут быть вычислены соответственно по формулам:

$$P_{\text{с.г.}} = 1 - q^n; \quad (13.12)$$

$$P_{\text{д.г.}} = 1 - \prod_{i=1}^n q_i. \quad (13.13)$$

Условная вероятность поражения цели  $G(m)$  определяется с помощью такого понятия, как условный закон поражения цели (УЗП). Он представляет собой зависимость поражения цели от числа попаданий  $m$ . УЗП является важной характеристикой живучести цели (корабля), а его конкретный вид зависит от соотношения живучести цели и мощности средств поражения. Под поражением цели в разных случаях можно понимать уничтожение цели, вывод ее из состояния боеспособности и т. п.

УЗП является убывающей функцией, может принимать значения  $0 \leq G(m) \leq 1$ , при этом  $G(0) = 0$ ,  $G(m) = 1$  при  $m \rightarrow \infty$ .

Часто используются три вида УЗП:

— единичный закон, при котором

$$\begin{aligned} G &= 0 \text{ при } m = 0; \\ G &= 1 \text{ при } m \geq 1; \end{aligned} \quad (13.14)$$

— ступенчатый закон, при котором

$$\begin{aligned} G &= 0 \text{ при } m < k; \\ G &= 1 \text{ при } m \geq k; \end{aligned} \quad (13.15)$$

— показательный закон, когда в качестве вероятности поражения объекта рассматривается вероятность попадания хотя бы одного средства поражения при  $n$  независимых выстрелах:

$$G(m) = 1 - [1 - G(1)]^m \quad (13.16)$$

или

$$G(m) = 1 - \exp(-\alpha m), \quad (13.17)$$

где  $G(1)$  — вероятность поражения цели при одном попадании;

$\alpha$  — параметр показательного закона;

$$\alpha = -\ln[1 - G(1)]. \quad (13.18)$$

При оценке живучести корабля часто применяется такая числовая характеристика УЗП, как математическое ожидание числа попаданий, необходимое для поражения цели:

$$\alpha = \sum_{m=1}^{\infty} [1 - G(m)]. \quad (13.19)$$



Для единичного, ступенчатого, показательного законов пораженности значения  $\alpha$  вычисляются по формулам:

$$\alpha = \sum_{i=1}^n 1 = n; \quad (13.20)$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^n 1 = K; \quad (13.21)$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^n [1 - G(i)]^n = V[G(i)]. \quad (13.22)$$

Учитывая (13.22), показательный закон можно записать через  $\alpha$ :

$$G(n) = 1 - \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right)^n. \quad (13.23)$$

При независимых выстрелах, одинаковых вероятностях попадания на каждый выстрел  $p$  и заданном числе выстрелов  $n$  и числе попаданий в цель  $m$  подчиняется биномиальному закону, а вероятность поражения цели может быть определена для единичного, ступенчатого и показательного законов соответственно по формулам:

$$W(n) = 1 - (1 - p)^n; \quad (13.24)$$

$$W(n) = \sum_{i=1}^n C_n^i p^i (1 - p)^{n-i}; \quad (13.25)$$

$$W(n) = 1 - (1 - p/\alpha)^n. \quad (13.26)$$

В данном параграфе рассмотрены основные подходы и допущения, которые используются для оценки боевой эффективности корабля. Далее будут более подробно рассмотрены некоторые методики оценки боевой эффективности корабля при решении им типовых задач.

### 13.2. ОЦЕНКА УДАРНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОЕКТИРУЕМЫХ КОРАБЛЕЙ

Для моделирования боевых действий и определения боевых возможностей проектируемых надводных кораблей при решении ими типовых задач могут использоваться различные модели,

приняты в зависимости от конкретных целей и задач исследования. В данной главе рассматриваются некоторые наиболее общие подходы, допущения, которые могут быть использованы при моделировании действий сил и оценке боевых возможностей надводных кораблей. Следует отметить, что при исследовательском проектировании, когда определяется преимущественно тип и количество принимаемого на корабль оружия, целью расчетов по оценке боевых возможностей кораблей является сравнение вариантов проектируемого корабля между собой для определения наиболее целесообразного из них. Вследствие того, что рассмотренно подэжит большое количество вариантов, оперативно-тактический блок математической модели функционирования корабля должен быть достаточно простым, ограниченным по объему и содержать основные зависимости, наиболее существенным образом обеспечивающие "эффект прожвения" исследуемого вооружения.

Первой из типовых задач надводных кораблей будет рассмотрена задача нанесения удара ракетным оружием по группам надводных кораблей противника.

Боевые возможности ракетных кораблей оцениваются следующими основными показателями эффективности:

— при действиях против групп боевых кораблей — вероятность поражения объекта главного удара. Если главных целей несколько — вероятность поражения каждой цели или математическое ожидание пораженных целей;

— при действиях против десантных отрядов или конвоев — математическое ожидание числа пораженных судов и кораблей.

В зависимости от целей и задач конкретного исследования модель оценки эффективности корабля как в ударной, так и в любой другой задаче может иметь свою специфическую структуру и особенности. Важно, чтобы показатель эффективности действительно соответствовал цели исследования и количественно отражал степень достижения цели в операции. Кроме того, необходимо, чтобы модель оперативно-тактического блока была чувствительна к изменению исследуемых варьируемых характеристик корабля и его подсистем. В случае решения ударной задачи прежде всего ими являются характеристики конфигура

ударного ракетного оружия; количественные и качественные характеристики противокорабельных крылатых ракет, систем управления, средств обеспечения целуказания ракетному оружию. Особую остроту при оптимизации комплекса ударного ракетного оружия, в первую очередь при определении комплексной дальности действия, имеет вопрос целуказания.

Целуказание может быть получено кораблем из следующих источников:

- от собственных корабельных средств освещения обстановки;
- от собственных летящих средств освещения обстановки (вертолетов, самолетов) с учетом дальности их действия;
- внешних источников целуказания, включая космические спутниковые системы.

Оптимизация дальности стрельбы ракетного комплекса должна вестись на основе оценки вероятности получения целуказания от того или иного источника.

При использовании в ударе однотипных крылатых ракет вероятность поражения каждого из кораблей ядра или охранения одной ракетой из состава группового залпа определяется следующим выражением:

$$E_{1i} = \frac{P_{\text{цел}} P_{\text{нац}} Q_{\text{нац}} P_{\text{нац}} P_{\text{нац}} k_{\text{нац}}}{N_{\text{г},0}} \quad (13.27)$$

где  $P_{\text{цел}}$  — вероятность того, что цель будет захвачена устройством самонаведения ракеты;  $P_{\text{нац}}$  — вероятность попадания ракеты в цель при самонаведении;  $Q_{\text{нац}}$  — вероятность безотказной работы ракеты;  $P_{\text{нац}}$  — вероятность того, что в условиях радиоэлектронного противодействия (РЭП) ракета будет наводиться на корабль ядра или корабль охранения;  $Q_{\text{нац}}$  — вероятность попадания каждой ракеты из залпа средствами ПВО противника;  $k_{\text{нац}}$  — коэффициент погодности (в данном случае среднее число дней в году, когда корабль может использовать ударное ракетное оружие);  $N_{\text{г}}$  — число кораблей ядра или охранения;  $\alpha$  — среднее необходимое число попаданий ракет для поражения цели.

Вероятность поражения каждого из различных типов кораблей ядра или охранения ракетным залпом корабля может быть определена как

$$E_{1i} = P_{\text{цел}} P_{\text{нац}} [1 - (1 - E_{1i})^N] \quad (13.28)$$

где  $P_{\text{цел}}$  — вероятность сохранения боеспособности ракетного корабля к моменту осуществления залпа;  $P_{\text{нац}}$  — вероятность получения ракетным кораблем целуказания;  $N$  — количество ракет в залпе.

Математическое ожидание числа пораженных кораблей каждого типа

$$\bar{N}_{\text{г}} = N_{\text{г}} E_{1i} \quad (13.29)$$

Почти все параметры в (13.27) зависят от ударных возможностей ракетного комплекса и оборонительных возможностей противника. Они характеризуются типом и количеством оружия, количеством кораблей, средствами освещения обстановки, обработки и передачи информации, возможностями ведения радиоэлектронной борьбы.

Наиболее сложно и важно определить  $Q_{\text{нац}}$ , как основную характеристику оборонительных возможностей противника в (13.27) и поражающих характеристик ударного ракетного комплекса, в первую очередь крылатой ракеты.

Оценка оборонительных возможностей противника производится с помощью так называемого поражающего потенциала. Под ним понимается математическое ожидание количества целей, которые могут быть сняты средствами ПВО без учета степени централизации управления, влияния электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств, взаимных помех кораблей и комплексов в организации стрельбы, числа воздушных целей и т. д. Поражающий потенциал характеризует максимальные возможности комплексов в полигонных условиях.

Возможности противника по противоракетной обороне складываются из возможностей истребительной авиации и зенитных средств средств корабля или группы кораблей.

Для определения возможностей истребительной авиации противника необходимо определить условия ее использования

по крылатым ракетам из состава залпа. Для этого определяется удаленные рубежи обнаружения  $D_{об}$ , крылатых ракет относительно объекта удара, которое зависит от месторасположения и возможности сна и средства радиолокационного дозора. В случае если противник имеет в составе своих сна авианосную авиацию (наиболее тяжелый случай), исходя из  $D_{об}$  скоростей полета истребителей, крылатых ракет, времени реакции дежурных звеньев, определяются возможности выхода в атаку истребителей, входящих в положение "дежурства в воздухе" и "дежурства на падубе".

Вероятность поражения каждой крылатой ракетой истребителями противника определяется формулой

$$Q_{ил} = 1 - P_{ин} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{n_i \mu_i}{n}\right) \right], \quad (13.30)$$

где  $n_i$  — количество истребителей, выходящих в атаку по крылатым ракетам;  $\mu_i$  — поражающий потенциал истребителя по крылатой ракете;  $P_{ин}$  — вероятность наведения истребителя на каждую крылатую ракету из состава залпа данного типа.

Математическое ожидание числа крылатых ракет, оставшихся непораженными истребителями, составит

$$\bar{n} = n Q_{ил}. \quad (13.31)$$

Для проведения оценки возможностей зенитных огневых средств кораблей противника необходимо определить суммарный временной размах залпа, то есть интервал времени между подходом к зоне ПВО первой и последней ракет залпа. Для этого определяется продолжительность пуска ракет залпа каждым ракетным кораблем  $T_j$

$$T_j = (n_j - 1) \tau_j, \quad (13.32)$$

где  $n_j$  — число ракет, выпускаемых  $j$ -го кораблем;  $\tau_j$  — временной интервал между очередными пусками ракет  $j$ -го корабля.

Суммарный временной размах залпа  $T_z$  составит:

$$T_z = T_{max}(T) [1 + k(N_p - 1)], \quad (13.33)$$

где  $N_p$  — число ракетных кораблей, участвующих в групповом залпе;  $k$  — статистический коэффициент.

После этого определяется поражающий потенциал зенитных огневых средств  $\mu_{зoc}$  для каждого типа кораблей противника, входящих в группу по крылатым ракетам на основании характеристик крылатых ракет, комплексов зенитного оружия, величины  $T_z$ .

Суммарный поражающий потенциал корабля  $k$ -го типа в группе с учетом коэффициента полноты использования зенитных огневых средств кораблей  $k_{зoc}$  составит

$$\mu_k = k_{зoc} \mu_{зoc k}$$

Коэффициент полноты использования учитывает снижение возможностей использования зенитных огневых средств вследствие появления "затененных" зон при расположении в центре нескольких кораблей, электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств и т. д.

Таким образом, вероятность поражения каждой крылатой ракеты из состава залпа при условии их наведения на корабль может быть определена из выражения:

$$Q_{зoc} = \exp\left(-\sum \frac{\mu_k N_k}{n_{ил}}\right), \quad (13.34)$$

где  $N_k$  — количество кораблей  $k$ -го типа противника.

Математическое ожидание количества несбитых ракет в залпе

$$\bar{n}_{зoc} = \bar{n} Q_{зoc}. \quad (13.35)$$

Вероятность несбития каждой крылатой ракеты средствами ПВО противника

$$Q_{инз} = Q_{ил} Q_{зoc}. \quad (13.36)$$

Изложенная математическая модель является одним из примеров вычисления показателя боевой эффективности проектируемого корабля при решении им задачи нанесения ракетного удара, чувствительного к количественным и качественным ха-

характеристикам ракетного оружия. Помимо характеристик собственно ракетного оружия и средств его целеуказания в исходной модели содержатся также параметры, учитывающие влияние на эффективность корабля его маневренности, электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств и др. Это позволяет исследовать взаимосвязанные характеристики корабля и устанавливаемого на нем оружия и вооружения.

### 13.3. ОЦЕНКА ПРОТИВОПОДВОДНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОЕКТИРУЕМЫХ КОРАБЛЕЙ

Важнейшими задачами, стоящими перед кораблями с противолодочным вооружением, являются задачи противолодочной обороны (ПЛО) корабля, соединения (консоля) и поиска и уничтожения подводных лодок (ПЛ) соединениями противолодочных кораблей.

Корабельные средства противолодочной борьбы с ПЛ в подводном положении включают гидроакустические средства обнаружения и противолодочное оружие. Кроме того, на корабельных противолодочных вертолетах имеются собственные средства обнаружения и уничтожения ПЛ.

По месту расположения акустической антенны гидроакустические станции (ГАС) подразделяются на подкильные и опускаемые, а в зависимости от способа обзора — на ГАС кругового обзора и шагового поиска.

Основным режимом работы подкильных гидроакустических станций является слежение за ПЛ, что позволяет вести поиск на больших скоростях хода корабля. Шумелегирование используется главным образом при классификации контактов с подводными лодками на поисковых скоростях хода до 10 уз. Опускаемые ГАС используются на стопе корабля.

Обнаружение подводной лодки является случайным событием. Случайные факторы, влияющие на обнаружение подводной лодки, разделяются на две категории. К первой категории относятся случайности взаимного расположения и перемещения поисковых ПЛ и подводных лодок. Ко второй категории случайностей относятся факторы, присущие самому факту обнару-

жения. Она разделяется на три основные группы: факторы, зависящие от цели (уровень шума, величина эквивалентного радиуса и др.); факторы, зависящие от поисковых сил (качество и режим работы средств обнаружения, уровень работы операторов и управления и др.); факторы, зависящие от среды (гидрологические условия, наличие ложных целей, отражающие свойства среды и грунта и др.). Случайные факторы второй категории определяют дальность обнаружения подводной лодки в тех или иных условиях.

Дальность действия ГАС при данных технических характеристиках и отражательной способности цели существенно зависит от уровня собственных корабельных акустических помех шумов моря и гидрологических условий, что обязательно должно учитываться при моделировании оценки эффективности решения кораблем противолодочных задач. В этом отношении необходимо учитывать при принятии исходных данных в моделировании различие между "энергетическими" (т. е. получаемыми в идеальных условиях) дальностями обнаружения ГАС и дальностями обнаружения в реальных условиях обстановки, в первую очередь с учетом гидрологии моря. Для этого можно анализировать условия в наиболее вероятных районах действия кораблей с учетом времени года.

Существенным компромиссным фактором при размещении ГАС на корабле является то, что для получения больших энергетических дальностей обнаружения подводных лодок необходимо принимать в бульбовый обтекатель приемно-излучающие антенны больших размеров, что влечет за собой увеличение размеров бульбовых обтекателей, и, как следствие, увеличение сопротивления воды движению корабля практически на всех скоростях хода (дополнительный расход топлива), увеличение водоизмещения корабля, сложности с архитектурной компоновкой носовой части, рост уровня помехи самой ГАС.

Дальность действия ГАС определяет дальнюю границу зоны наблюдения ГАС корабля. Другие границы этой зоны определяются пределами обзора водного пространства по условиям координат (сектор обзора) и "мертвой зоной". Сектор обзора подкильных ГАС может составлять до 300°, а по корме ограничи-

вается горизонтальной зоной до  $90^\circ$  на-за боковой помех на ко-ду корабля.

Для уничтожения пл на кораблях размещаются установки для пуска ракет-торпед, торпедные аппараты, реактивные бом-бометные установки.

### Оценка эффективности корабля при решении задачи противолодочной обороны соединения

Целью противолодочной обороны соединения в море является недопущение поражения кораблей (транспортов) оружием подводных лодок, что подразумевает своевременное обнаруже-ние и надежное уничтожение противника до занятия им позиции эффективного применения оружия по нашим охраняемым силам.

Основными зонами вокруг охраняемых сил, находясь или попадая в которые подводная лодка противника становится опасной, является зона обнаружения и зона стрельбы.

Зоной обнаружения является область, попадающая в которую пл противника может обнаружить охраняемые силы собственными средствами наблюдения.

Зоной стрельбы является область, из которой пл противника может атаковать охраняемые силы своим оружием (ракетами или торпедами).

Наиболее опасной является зона торпедной стрельбы, т. е. из нее пл может выполнить атаку торпедами с достаточно высокой вероятностью поражения. Эта зона представляет собой окруж-ность радиусом

$$R_{\text{ст}} = r_{\text{ст}} + l_{\text{ст}}, \quad (13.37)$$

где  $r_{\text{ст}}$  — радиус окружности, вмещающей ордер охраняемых сил,  $l_{\text{ст}}$  — дальность хода торпеды, при которой обеспечивается достаточно высокая вероятность поражения целей.

Главным требованием к походному ордеру в интересах ПЛО является создание вокруг охраняемых кораблей сплошной зоны гидроакустического наблюдения, обеспечивающей своевре-менное обнаружение и уничтожение пл до их выхода на позиции эффективного применения торпедного оружия по охраняемым кораблям.

Построение ордера в интересах ПЛО может предусматри-вать, кроме корабельного охранения, также и ближнее воздуш-ное противолодочное охранение (БВО), которое для обеспечения "эффекта провидения" в последовательном проектировании при моделировании предусматривается обеспечивать вертолетами, базированными на кораблях соединения.

Вероятность уничтожения прорывающейся подводной лодки в зоне действия ближнего воздушного охранения можно опреде-лить по формуле:

$$P_{\text{унич}} = P_{\text{об}} [P_{\text{стр}} + (1 - P_{\text{об}}) P_{\text{об}} P_{\text{стр}}], \quad (13.38)$$

где  $P_{\text{об}}$  и  $P_{\text{стр}}$  — соответственные вероятность обнаружения и вероятность поражения пл вертолетами ближнего воздушного охранения;  $P_{\text{стр}}$  — вероятность обнаружения подводной лодки корабельной ПУГ по наведению вертолетов БВО;  $P_{\text{стр}}$  — вер-оятность поражения подводной лодки корабельной ПУГ в ре-зультате наведения вертолетами БВО.

$P_{\text{об}}$  и  $P_{\text{стр}}$  могут рассчитываться по формулам для условной действии на противолодочном рубеже. В частности, при поста-новке силами БВО барьеров буев значение  $P_{\text{об}}$  может принима-ться равным вероятности обнаружения пл на барьере буев.

Если вертолеты используют опускаемые ГАС, то значение вероятности  $P_{\text{об}}$  можно рассчитать по формуле:

$$P_{\text{об}} = 1 - \exp\left(-\frac{U_{\text{в}} N_{\text{в}} l_{\text{ГАС}}}{S_{\text{соед}}}\right), \quad (13.39)$$

где  $U_{\text{в}}$  — поисковая производительность вертолета с ОГАС;  $N_{\text{в}}$  — число вертолетов на линии БВО;  $S_{\text{соед}}$  — площадь кольца вдоль линии БВО, в пределах которого вертолеты ведут поиск с ОГАС;

$$S_{\text{соед}} = \pi(D_{\text{макс}}^2 - D_{\text{мин}}^2), \quad (13.40)$$

где  $D_{\text{макс}}$  и  $D_{\text{мин}}$  — максимальный и минимальный радиусы кольца.

$$D_{\text{макс}} - D_{\text{мин}} = (3 + 5)l_{\text{в}}, \quad (13.41)$$

$A$  — дальность обнаружения подводной лодки вертолетной ОГАС;  $t_{прор}$  — время, в течение которого возможно обнаружение (время прорыва пл через коды);

$$t_{прор} = \frac{D_{обн} - D_{пл}}{v_{пл}} \quad (13.42)$$

$v_{пл}$  — скорость относительная скорость при прорыве подводной лодки на позицию стрельбы.

$P_{прор}$  может рассчитываться по формуле:

$$P_{прор} = P_{обн} \exp\left(\frac{-t_{прор}}{t_{обн}}\right), \quad (13.43)$$

где  $P_{обн}$  — вероятность прорыва подводной лодки через поисковую строй кораблей;  $t_{обн}$  — время передачи контакта вертолетами БВК взаимодействующим кораблям;  $t_{прор}$  — среднее время поддержания контакта с подводной лодкой вертолетами БВК.

Эффективность корабельного противолодочного охранения оценивается также вероятностью уничтожения подводной лодки  $P_{унич}$ , которая рассчитывается по формуле:

$$P_{унич} = P_{обн} P_{стрел} \quad (13.44)$$

где  $P_{обн}$  — вероятность обнаружения прорывающейся подводной лодки на линии корабельного охранения;  $P_{стрел}$  — вероятность поражения подводной лодки группой кораблей охранения.

Если считается, что подводная лодка пытается пройти незамеченной между кораблями охранения, вероятность ее обнаружения определяется по формуле:

$$P_{обн} = P_{обн} P_{с} = \left[1 - \Phi\left(\frac{D_{ср} - 2d_{обн}}{2d}\right)\right] P_{с}, \quad (13.45)$$

где  $P_{с}$  — вероятность установления и правильной классификации контакта;  $D_{ср}$  — среднее значение расстояния между соседними кораблями на линии охранения;  $d_{обн}$  — дальность обнару-

жения кораблями ГАС;  $E$  — средняя ошибка в определении подводной лодкой места прорыва между соседними кораблями.

Если  $D_{ср} \leq 2d_{обн}$ , то  $P_{обн} = 1$ .

Вероятность поражения подводной лодки при выполнении совместной атаки кораблями охранения с учетом противодействия может быть рассчитана по приближенной формуле:

$$P_{унич} = 1 - \exp\left[-\sum_{i=1}^{N_k} \left[(1-W)^{n_i} P_{сi} P_{сi} P_{сi}\right]\right], \quad (13.46)$$

где  $N_k$  — число атакующих кораблей из состава корабельного охранения;  $W$  — вероятность поражения противоположного корабля торпедами подводной лодки;  $n_i$  — число залпов торпед на подводную лодку по  $i$ -у атакующему кораблю до того, как он начнет атаку;  $P_{сi}$  — вероятность установления контакта  $i$ -ым атакующим кораблем перед выполнением очередной атаки;  $P_{сi}$  — число атак подводной лодки корабельным оружием;  $P_{сi}$  — вероятность попадания в подводную лодку за одну атаку.

#### *Оценка эффективности корабля при решении задачи поиска и уничтожения подводных лодок*

Поиск называется организованное обследование водной среды с целью обнаружения подводных лодок противника для их уничтожения или установления за ними слежения.

Основными видами поиска пл противоположными кораблями являются поиск в назначенном районе, поиск на рубеже, поиск по высоте. При поиске пл противоположные корабли маневрируют в определенных поисковых строях, которые обеспечивают достижение наибольшей поисковой производительности за счет высокой поисковой скорости, целесообразного расстояния между кораблями, загрузки уклонения пл. Строй кораблей называют сомкнутым, когда расстояние между соседними кораблями равно двум эффективным дальностям действия ГАС.

Строями, которые используются при поиске лодок, являются: строй фронта, строй фронта с выдвинутыми фланговыми кораблями, строй обратного клина, строй пеленга. Основными

видом поискового строя КПУГ, который применяется чаще других, является строй фронта.

Совместно с кораблями поиск подводной лодки могут осуществлять корабельные вертолеты, не позволяющие опускаться ГАС или радиогидроакустические буи. При этом вертолеты могут располагаться на флажках и впереди по курсу кораблей, ставить флажковые барьеры радиогидроакустических буев вдоль полосы обследования корабельной ПУГ.

Если на проектируемом корабле предусматривается размещение вертолетов, то модель должна быть чувствительной к изменению параметров, связанных с данным обогатителем-ством. Это, прежде всего, относится к необходимости размещения ангара, вертолётной площадки, запасов авиационного топлива, от которых зависит количество вылетов без дозаправки корабля.

Эффективность поиска определяется множеством случайных факторов, поэтому обнаружение подводной лодки носит вероятностный характер. Событие, состоящее в попадании цели в зону действия станция наблюдения, принято называть встречей, а событие, состоящее в обнаружении и правильной классификации цели, находящейся в зоне действия станция, — контактом.

Основной характеристикой поисковых возможностей корабельной поисково-ударной группы (КПУГ) является ее поисковая производительность. Она показывает величину площади, эффективно обследуемой КПУГ за час (или за сутки).

Поисковая производительность  $U_{\text{КПУГ}}$  рассчитывается с учетом возможного уклонения пл от обнаружения путем выхода из полосы обследования КПУГ или прорыва его поискового строя. Для случая поиска в назначенном районе поисковую производительность КПУГ можно определить по формуле:

$$U_{\text{КПУГ}} = B v_{\text{КПУГ}} P_{\text{встр}} P_{\text{кон}} \quad (13.47)$$

где  $B$  — эффективная ширина полосы поиска КПУГ, т. е. длина участка дна начала уклонения пл, при попадании на который пл, при принятом соотношении скоростей КПУГ и пл, не может выйти из полосы, обследуемой КПУГ;

$$B = \Pi_{\text{пл}} + 2d_{\text{ГАС}} \tan Q - 2D_{\text{встр}} \tan Q \quad (13.48)$$

где  $\Pi_{\text{пл}}$  — ширина поискового строя кораблей;

$$\Pi_{\text{пл}} = (N_{\text{пл}} - 1) D_{\text{пл}} \quad (13.49)$$

где  $N_{\text{пл}}$  — число кораблей в поисковом строю;  $D_{\text{пл}}$  — расстояние между соседними кораблями в строю;  $d_{\text{ГАС}} \tan Q$  — дальность обнаружения ГАС флажковых кораблей;  $Q$  — критический курсовой угол строя кораблей;

$$Q = \arcsin \frac{v_{\text{пл}} \sin \alpha}{v_{\text{КПУГ}}} \quad (13.50)$$

где  $v_{\text{пл}} \sin \alpha$  — скорость пл при уклонении,  $v_{\text{КПУГ}}$  — генеральная скорость кораблей.

$$v_{\text{КПУГ}} = v_{\text{пл}} \cos \alpha \quad (13.51)$$

где  $v_{\text{пл}}$  — скорость корабля;  $\alpha$  — угол зигзага;  $D_{\text{встр}}$  — дистанция уклонения противника.

Вероятность обнаружения подводной лодки КПУГ рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{об}} = 1 - \exp\left(-\frac{U_{\text{КПУГ}} T_{\text{пл}}}{S}\right) \quad (13.52)$$

где  $T_{\text{пл}}$  — время, в течение которого ведется поиск;  $S$  — площадь района поиска.

Вероятность обнаружения подводной лодки вертолетами и опускаемыми ГАС, используемыми в пассивном режиме, рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{об}} = 1 - \exp\left(-\frac{U_{\text{г}} T_{\text{пл}}}{S_{\text{г}}}\right) \quad (13.53)$$

где  $T_{\text{пл}}$  и  $S_{\text{г}}$  величины, аналогичные, принятым в (13.52).

Поисковая производительность группы вертолетов определяется по формуле:

$$U_{\text{г}} = \frac{(\pi d_{\text{г}}^2 + 2d_{\text{г}} v_{\text{г}} t_{\text{сп}}) N_{\text{г}} P_{\text{г}}}{t_{\text{сп}} + t_{\text{обс}} + t_{\text{пл}} + t_{\text{воз}}}, \quad (13.54)$$

где  $d_{\text{г}}$  — дальность действия ОГАС вертолета;  $v_{\text{г}}$  — скорость подводной лодки;  $t_{\text{сп}}$  — время опускания гидрофона ОГАС;  $t_{\text{обс}}$  — время обследования водной среды;  $t_{\text{пл}}$  — время полета

гидрофона;  $t_{пер}$  — время перелета вертолета в соседнюю точку зависания.

Для случая совместного поиска кораблями и вертолетами в общем поисковом строю с расположенным вертолетом на флангах кораблей расчет вероятности обнаружения можно производить следующим образом:

$$P_{совм} = 1 - \exp\left(-\frac{U_{совм} T_{ср}}{N}\right), \quad (13.55)$$

где  $U_{совм}$  — поисковая производительность ПУГ при совместном поиске кораблями и вертолетами, которая определяется по формуле

$$U_{совм} = U_{верт} + KU_{к}, \quad (13.56)$$

где  $K$  — коэффициент, учитывающий увеличение поисковой производительности вертолетов за счет уклонения подводной лодки из полосы обследования кораблей в полосу, обследуемую вертолетами. Значение коэффициента  $K$  зависит от соотношения скорости хода на при уклонении и генеральной скорости хода кораблей группы поиска.

Вероятность уничтожения подводной лодки определяется:

$$P_y = P_{совм} P_{вер}, \quad (13.57)$$

где  $P_{вер}$  — вероятность поражения подводной лодки кораблями КПУГ и вертолетами, которую можно определить из (13.38), (13.46).

#### 13.4. ОЦЕНКА БОЕВОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЕКТИРУЕМЫХ КОРАБЛЕЙ ОТ СРЕДСТВ ВОЗДУШНОГО НАПАДЕНИЯ

Целью противовоздушной обороны (ПВО) является обеспечение боевой устойчивости кораблей от ударов сил и средств воздушного нападения противника. Организация ПВО должна обеспечивать своевременное обнаружение воздушного противника, оповещение о нем, уничтожение самолетов и противокорабельных ракет до рубежа выполнения ими своих задач, снижение эффективности ударов воздушного противника подавлением его радиолокационных средств, тактической маскировкой.

В настоящее время угрозу с воздуха представляют не только самолеты и вертолеты противника, но и подводные корабли и подводные лодки, имеющие на вооружении противокорабельные ракетные ракеты.

Так называемый контур ПВО корабля должен решать следующие задачи:

- обнаружение средств воздушного нападения (СВН) противника;
- целераспределение и целеуказание зенитным огненным средствам (ЗОС);
- обстрел СВН ЗОС.

В соответствии с задачами в контур ПВО входят системы и средства обнаружения воздушных целей, обработки полученных данных, выдачи целеуказания, зенитные огневые средства.

Основная характеристика средств обнаружения — дальность обнаружения всех и каждой в отдельности воздушных целей, появившихся в зоне действия ПВО корабля, которая зависит от параметров радиолокационных станций, отражающих свойства цели, условий распространения радиоволн.

Результатом решения задачи целераспределения является определение совокупности целей, которые назначаются для обстрела и поражения каждому данному комплексу, с тем, чтобы внести максимальный вклад в обеспечение боевой устойчивости кораблей. Сложность решения этой задачи заключается в том, что:

- нет полной информации о количественном составе, характеристиках целей, параметрах полета на-за одновременности обнаружения всех целей боевого порядка, мероприятий противника по маскировке, скрытию основных замкнов и организации полета;

- количество и типы целей, которые могут быть назначены для обстрела каждому комплексу должны быть согласованы с числом стрельбы, которые он способен выполнять по этим целям и с эффективностью каждой стрельбы. Под стрельбой понимается пуск одной зенитной управляемой ракеты (ЗУР) или производство залпа ЗУР заданного состава, определяемого режимом огня, по одной цели из состава полета, а также определенное



количество выстрелов, произведенных зенитными артиллерийскими средствами за время обстрела одной цели. Под результатом огня понимается определение состава зады ЗУР (одной или нескольких) по одной цели. Основой контуры ПВО корабля являются зенитные огневые средства, к которым относятся зенитные ракетные комплексы (ЗРК), зенитные артиллерийские комплексы (ЗАК).

Одной из важнейших характеристик ЗРК является зона поражения, которая представляет собой пространство, в пределах которого ЗУР может поразить цель, летящую с определенного направления, с вероятностью не менее заданной. Каждый тип ЗРК имеет свою зону поражения, которая ограничивается по высоте — верхней и нижней границами, по дальности — дальней и ближней границами, по курсовому параметру — боковыми поверхностями.

Зону поражения ЗРК не следует смешивать с зоной обстрела, которая определяется для каждого ЗРК, размещенного на корабле, и зависит главным образом от углов обстрела пусковых установок и углов обзора антенн системы управления.

С точки зрения дальности действия ЗРК кораблей в целом подразделяются на ЗРК самообороны, которые предназначены для поражения воздушных целей в интересах самообороны отдельных кораблей, и ЗРК, способные обеспечить коллективную оборону кораблей в порядке или походном порядке.

Зенитные артиллерийские комплексы являются важной составной частью ЗОС корабля, а на многих кораблях остаются единственными огневыми средствами ПВО. В контуре ПВО ЗАК обладают такими тактическими свойствами, как возможность вести огонь в пределах мертвых зон ЗРК, способность поражать цели на малых и предельно малых высотах, ведение огня по целям до минимальных значений рубежей выполнения задачи.

ПВО соединенный надводных кораблей наилучшим образом обеспечивается при их построении в круговые походные порядки, так как атаке воздушного противника, как правило, вероятны с любых направлений.

Расположение кораблей в походном порядке должно обеспечить наиболее эффективное использование зенитных огневых

средств, уменьшение эффективности ударов противника, круговое наблюдение, свободу маневра и удобство управления.

Задача отражения налета СВН противника, особенно если идет речь о достаточно современных средствах нападения, является одной из самых сложных задач обороны для надводных кораблей. Одной из основных причин этого является высокая степень дилатантности, скоротечности процесса отражения налета СВН. Современные надводные корабли оснащаются достаточно эффективными зенитными огневыми средствами и теоретически, как бы в "идеале", имеют высокие суммарные значения полных боевых потенциалов средств ПВО. Однако суммарная эффективность системы ЗОС не равна сумме эффективностей всех средств ее составляющих. Именно по причине сложности решения задачи противозащитной обороны корабля, соединения, модель оценки возможности ПВО проектируемого корабля должна учитывать факторы, вносящие негативный характер в процесс функционирования элементов контура ПВО и не позволяющие реализовать полные суммарные боевые потенциалы средств ПВО. Неучет этого обстоятельства неизбежно приведет к нарушению адекватности модели оценки эффективности и, как следствие, к ее завышенным значениям. Спектр подобных факторов в процессе создания, функционирования, боевого применения корабля достаточно широк. Применительно к системе ПВО корабля, можно привести следующие примеры.

1. В части расположенных воздушных и зенитных кораблей. Каждый зенитный комплекс может применить оружие только в своих секторах обстрела, что существенно снижает возможность реализации полных боевых потенциалов.

В процессе отражения налета ракетных и артиллерийских комплексов. Все элементы системы ПВО имеют определенный уровень технической надежности, что ведет к отказам их как в процессе боя, так и накануне. Исключительно сложноразрешимой проблемой является обеспечение электромагнитной совместимости радиотехнических средств. При модернизации необходимо учитывать, что на корабль принимается боезапас в количестве, которое должно обеспечить отражение нескольких типо-

ных налетов средств воздушного нападения противника в период выхода корабля в море без пополнения боезапаса. Несообразное увеличение количества принимаемого боезапаса приводит к увеличению водоизмещения корабля и снижает его боевую живучесть.

2. В части обнаружения и сопровождения воздушных целей корабельными радиолокационными средствами. Дальности обнаружения воздушных целей являются случайными величинами вследствие флуктуации эффективной площади рассеивания целей во времени и по ракурсу. Точности и время определения координат и элементов движения целей корабельными радиолокационными станциями и выдачи целеуказания зенитным комплексам могут быть недостаточными. Возможны сбросы сопровождения. Образование ложных трасс и групповых целей, ложное отождествление различных целей, возникновение ложных целей. Наконец, сами корабельные РЛС имеют ограничения по числу сопровождаемых целей.

3. В части систем управления оружием. Все системы управления имеют определенные рабочие времена. В боевых информационно-управляющих системах (БИУС), в комплексах средств автоматизации рабочих времени, сроки решения задач часто не отвечают в реальных условиях необходимым для отражения налетов СВН значениям. Рабочие времена имеются в действиях операторов, вероятны ошибочные действия. Требуется время на принятие решений командным составом.

Имеются также временные задержки при передаче целеуказания, досадах о поражении воздушных целей, при перенацеливании комплексов и т. д.

При централизованном перераспределении необходимо учитывать наличие ложных целей, групповых целей, ошибки в определении элементов движения целей.

При децентрализованном перераспределении возможно нецелесообразное сосредоточение огня разных комплексов на одной и тех же целях.

Сложна организация взаимодействия и совместного использования ЗОС и средств РЭБ.

4. В части применения корабельного зенитного оружия. Здесь можно указать такие факторы как:

- необходимость догонки целей при источном целеуказании;
- отказы от стрельбы при выходе целей из зоны пуска;
- времена наблюдения результатов стрельбы являются случайными величинами, так же как и реализуемые зоны, рубежи поражения целей при уменьшении случайных дальностей обнаружения и выдачи целеуказания;
- обстрел ложных целей или уже обстреленных, пораженных.

В исследованиях и моделях, создаваемых специалистами в области тактики и оружия, в значительной степени данные факторы учитываются при оценке эффективности уже созданных кораблей с целью оптимизации способа действий, отработки приемов применения оружия. Данные модели являются, как правило, имитационными и имеют значительный объем. Однако при решении задачи оптимизации характеристик проектируемого корабля, т. е. при решении общей задачи синтеза, подобный подход к моделированию не может быть практически реализован из-за необходимости редукции каждой задачи отдельной предметной области, входящей в общую задачу.

При решении задач оптимизации ТТХ корабля на стадии последовательного проектирования невозможно обеспечить тот объем исходной информации, который используют по уже обстреленным кораблям специалисты в области тактики. Таким образом, моделировать в задаче синтез факторы, снижающие степень реализации боевых возможностей корабля, так, как это делается в специальных имитационных моделях, невозможно.

В том или ином исследовании в зависимости от его целей и задач моделирование факторов, снижающих степень реализации полных потенциалов, может выполняться при помощи различных подходов. В качестве примеров моделирования подобных факторов можно привести следующие:

- учет степени участия по секторам обзора и обстрела боевых средств ПВО в отражении ударов с различных направлений;
- учет степени реализации боевого управления, возможности перераспределения огневых средств;

— учет необходимости принятия на корабль боезапасов обеспечивающего отражение нескольких залпов противника до его пополнения;

— учет ограничения роста живучести корабля при увеличении водоизмещения корабля в случае, когда рост водоизмещения определяется преимущественно принятием дополнительного боезапаса.

В качестве показателя эффективности в решении задачи ПВО могут быть использованы различные виды показателей. Среди наиболее часто используемых можно привести также, как вероятность сохранения кораблем боеспособности, математическое ожидание количества непораженных кораблей, математическое ожидание числа стрельб, выполняемых ЗОС по залпострелкам СВН и эффективности каждой стрельбы по данной цели. Число стрельб, которое один ЗРК способен выполнить за время отражения одного залпа принятого размера залпа, может быть определено по формуле

$$\mu_n = \sum_{i=1}^{k_n} \frac{1}{\ln \left( 1 + \frac{v_i}{v_p} \right)} \times \quad (13.58)$$

$$\times \ln \left[ \frac{D_{\text{обн}} - v_p T_{\text{обн}} - (k-1)v_i (\tau_i - T_p + v_i \left( 1 + \frac{v_i}{v_p} \right) (T - k_i T_i))}{D_{\text{отр.обн}} + v_i (T - k_i T_i)} \right]$$

где

$$T = t_{\text{ЗУР}} + t_{\text{обн}} + T_{\text{обл}} \quad (13.59)$$

В (13.58) и (13.59) приняты следующие обозначения:  $t_n$  — интервал хода ЗУР;  $T_p$  — интервал между СВН в залпе или средний интервал входа целей в зону поражения ЗРК;  $k_n$  — число целевых каналов комплекса;  $v_i$  — приведенная скорость цели;  $v_p$  — приведенная скорость ЗУР;  $D_{\text{обн}}$  — дальность обнаружения

цели;  $T_{\text{обл}}$  — рабочее время комплекса по подготовке и производству первого залпа;  $k_c$  — число ЗУР в залпе по одной цели;  $D_{\text{отр.обн}}$  — ближняя граница действующей зоны поражения ЗРК;  $t_{\text{обн}}$  — время приведения комплекса в готовность к приему нового целеуказания;  $t_{\text{обл}}$  — рабочее время ЗРК по подготовке и производству второго и последующих залпов;  $t_{\text{отр}}$  — интервал времени между разрывами первой и второй ЗУР одной стрельбы в районе цели.

Имея число стрельб, выполняемое одним комплексом, число СВН в залпе, а также предположив, что все СВН могут быть обстрелены, можно определить количество ЗРК, необходимое для обеспечения заданного числа стрельб

$$N_{\text{зр}} = \frac{N_{\text{стр}}}{\mu_c} \quad (13.60)$$

Показатель эффективности ЗОС корабля при отражении залпа СВН противника зависит не только от состава ЗОС, но и от варианта их распределения по отдельным целям, участвующим в залпе. Центраспределение может быть рассмотрено в вариантах:

- равномерное (детерминированное);
- равномерное случайное.

Центраспределение является детерминированным (централизованым), если управление огнем осуществляется "идеальным" образом, без помех и исключений: каждое целевое средство достоверно направляется на предначинанную ему цель. В этом случае вероятность несбития каждого СВН в залпе можно записать в виде

$$P_{\text{обл}} = (1 - P_{\text{обл.стр}})^{N_{\text{стр}} N_{\text{СВН}}} \quad (13.61)$$

где  $P_{\text{обл.стр}}$  — вероятность поражения СВН средством ЗОС за одну стрельбу;  $N_{\text{стр}}$  — число стрельб, произведенных известными описанными средствами при отражении залпа;  $N_{\text{СВН}}$  — количество СВН в залпе.

Равномерным случайным является центраспределение, когда ЗОС корабля может с определенной вероятностью действовать по любому СВН залпа. Частным случаем равномерного случайного управления является равномерное децентрализованное

целераспределение, при котором вероятность события каждого СВН в налете можно записать

$$P_{\text{нал}} = \left(1 - \frac{P_{\text{вылет}}}{N_{\text{свн}}}\right)^{N_{\text{свн}}} \quad (13.62)$$

Централизованное целераспределение эффективнее, чем равномерное децентрализованное. Однако если децентрализованное управление не является равномерным, то при ведении управления из нескольких независимых пунктов могут появиться общие для всех пунктов чрезмерные стремления атаковать одну и ту же часть группы СВН при том, что какая-то часть группы останется необстрелянной. Такое неравномерное децентрализованное управление может привести к значительному снижению эффективности в сравнении с равномерным целераспределением.

Вероятность сохранения боеспособности корабля при отражении налета СВН запишется в следующем виде

$$E_{\text{св}} = (1 - E_{\text{св}})^{N_{\text{св}}} \quad (13.63)$$

где  $E_{\text{св}}$  — вероятность потери боеспособности корабля при попадании каждого СВН.

Эту величину можно определить как

$$E_{\text{св}} = \frac{P_{\text{нал}} P_{\text{свн}}}{\omega_s} \quad (13.64)$$

где  $P_{\text{нал}}$  — вероятность попадания СВН в корабль;  $\omega_s$  — среднее число попаданий ракет, необходимых для потери боеспособности корабля;  $P_{\text{свн}}$  — вероятность события каждого СВН средствами ЗОС.

Математическое ожидание числа кораблей, сохранивших боеспособность, после налета СВН, определяется по формуле:

$$MO_{\text{св}}^{\text{св}} = N_s E_{\text{св}} \quad (13.65)$$

где  $N_s$  — общее число кораблей.

Проведенные выше зависимости предполагают, что на корабле принят один тип ЗРК, в налете участвуют однотипные

СВН, корабли в составе соединения так же однотипны. В случае снятия подобного допущения зависимости могут принять более сложный вид, хотя характер их сохраняется, как правило.

На ранних стадиях боевого использования в составе сил флота при решении тех или иных задач. При проектировании таких кораблей основного класса, как крейсер, эсминец, фрегат является типичным рассмотрением их в составе соединений сил флота в процессе решения задач операции флота. В процессе ведения боевых действий при проведении операции флота корабли не будут иметь возможность пополнять контингент боезапаса в течение 3—4 суток. Предполагается, что за это время соединения будут подвергаться неоднократным ударам сил противоборствующего, в том числе и воздушного, противника. В связи с этим в расчетах эффективности боезапаса они должны выдерживать несколько налетов СВН противника. С учетом вероятности сохранения боеспособности корабля в первом и втором налетах общее количество боезапаса, необходимого для отражения, например, трех налетов составляет

$$N_{\text{свн}} = N_{\text{свн}}(1 + E_{\text{св}} + E_{\text{св}}^2) \quad (13.66)$$

где  $E_{\text{св}}^2$  — вероятность сохранения боеспособности корабля после второго налета СВН противника, которая определится для равномерно децентрализованного целераспределения.

$$E_{\text{св}}^2 = E_{\text{св}} \left[1 - \frac{P_{\text{нал}}}{\omega_s} \left(1 - \frac{P_{\text{вылет}}}{N_{\text{свн}}}\right)^{N_{\text{свн}}}\right]^{N_{\text{свн}}} \quad (13.67)$$

Для детерминированного целераспределения аналогично запишем

$$E_{\text{св}}^2 = E_{\text{св}} \left[1 - \frac{P_{\text{нал}}}{\omega_s} \left(1 - \frac{P_{\text{вылет}}}{N_{\text{свн}}}\right)^{\frac{N_{\text{свн}}}{N_{\text{свн}}}}\right]^{N_{\text{свн}}} \quad (13.68)$$

Аналогичные выкладки могут быть приведены и для любого числа налетов СВН.

## РАЗДЕЛ VI

### ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ НАДВОДНЫХ КОРАБЛЕЙ

#### Глава 14. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ОПТИМИЗАЦИИ ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОРАБЛЯ

##### 14.1. ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ. ОСНОВНАЯ ЗАДАЧА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Как можно было увидеть из предыдущих разделов учебника, современные практические задачи исследовательского проектирования отличаются сложностью, содержат большое число параметров и требуют значительных затрат времени на описание, решение и последующий анализ. Поэтому, прежде чем приступить к изложению настоящего раздела теории проектирования, рассмотрим один специально упрощенный пример, чтобы была ясна основная идея изложения.

Предположим, что предстоит спроектировать корабль. В общем случае это могло бы быть и судно, существенно здесь будет лишь то, что этот корабль или судно предназначены для несения некоторой полезной нагрузки. Как известно, для корабля полезной нагрузкой является масса всего оружия и вооружения, устанавливаемого на корабле, и боезапаса к нему.

Если предположить, что масса полезной нагрузки известна и равна  $P_{\text{пл}}$ , то традиционная задача проектирования сводится к определению главных элементов корабля, способного нести такую нагрузку, т. е. его водоизмещения ( $D$ ), главных размерений (длины, ширины, осадки и др.), мощности главной энергетической установки, необходимой для движения кораблем заданной скорости хода (или, наоборот, скорости, которую может развивать корабль с имеющейся в распоряжении проектанта энергетической установкой), запаса топлива, обеспечивающего задан-

ную дальность плавания (или дальность плавания при заданном запасе топлива), и т. п. В отличие от задачи прямого расчета уже спроектированного корабля, в которой при известных водоизмещении и главных размерах определяются прочность корпуса, скорость хода и другие характеристики, рассматриваемая задача получает название обратной (см. гл. 6). Соотношение между прямой и обратной задачами находится в методологическом соответствии с задачами анализа и синтеза любого инженерного сооружения, механизма, узла или даже детали. Таким образом, традиционная задача проектирования предполагает определение главных элементов корабля по заданной полезной нагрузке. Эта задача может быть решена различными путями. Как было показано в разделе III, в первом приближении она сводится к решению алгебраического уравнения методом последовательных приближений относительно водоизмещения корабля (остальные элементы определяются как функции от водоизмещения).

Поскольку при традиционной постановке задачи полезная нагрузка проектируемого корабля принимается заданной, то эта задача соответствует этапу проектирования, следующему за задачей проектианта тактико-технического задания, т. е. этапу эскизного проекта. Поэтому основными потребителями задач этого класса являются проектно-конструкторские организации промышленности (в данном случае не учитываются интересы разработчиков систем автоматизированного исследовательского проектирования, в рамках которых реализуется весь комплекс исследовательских задач). Если поставить задачу теоретического обеспечения более ранних этапов создания корабля, т. е. этапов исследовательского проектирования, то необходимо предположить, что состав оружия и вооружения проектируемого корабля, определяющие его полезную нагрузку, неизвестны. В этом случае рассмотренная ранее традиционная задача получит новое развитие. Суть его будет состоять в том, что в качестве неизвестных в этой новой задаче будут выступать уже не только главные размеры корабля и его водоизмещение, но и сам состав оружия и вооружения корабля, т. е. его полезная нагрузка. Так, предположим, что полезная нагрузка корабля  $P_{\text{пл}}$  состоит только из ком-

циска крылатых ракет. Тогда, если общее количество ракет в комплексе равно  $N_p$ , то выполняется соотношение

$$P_m = N_p m_p, \quad (14.1)$$

где  $m_p$  — масса комплекса, приходящаяся на одну ракету.

Увеличение числа независимых задач (в данном случае это величины  $D$  и  $N_p$ ) требует увеличения и числа уравнений.

При составлении дополнительного уравнения прежде всего следует ответить на вопрос, какой из множества вариантов корабля, отвечающих каждому значению величины  $N_p$ , будет более предпочтительным. Выбор предпочтительного варианта корабля оказывается непосредственно связанным с оценкой стоимости корабля цели его создания. В данном случае будем считать, что лучшим образом отвечает замыслу проекта тот вариант, которому соответствует наименьшее значение отношения вида

$$g = SE, \quad (14.2)$$

где  $S$  — стоимость создания и содержания корабля;  $E$  — показатель эффективности решения кораблем задачи, связанной с поражением противника крылатыми ракетами.

В теории оптимизации величины  $g$  получили название критерия или целевой функции. Для раскрытия выражения, определяющего функцию  $g$ , необходимо выписать дополнительно два показателя. Особенности, связанные с определением этих показателей, были рассмотрены в предыдущем разделе учебника, сейчас же примем наиболее простые и физически явные выражения. Пусть  $S$  линейно зависит от водоизмещения корабля и числа размещаемых на нем ракет:

$$S = k_1 D + k_2 N_p + k_3, \quad (14.3)$$

где  $k_1, k_2, k_3$  — статистические коэффициенты.

В качестве показателя эффективности рассмотрим вероятность  $P_m$  поражения цели при нескольких выстрелах в следующем виде

$$E = P_m = 1 - \exp(-P_p N_p / \alpha_p), \quad (14.4)$$

Здесь  $P_p$  — вероятность попадания в цель при выстреле одной ракетой;  $\alpha_p$  — среднее число попаданий в цель, необходимое для ее поражения. (Считается, что весь ракетный боезапас находится в пусковых установках.)

Выражение (14.4) не учитывает целый ряд существенных факторов реального процесса, например вероятности обнаружения цели, возможное противодействие противника, различные ограничения и многое другое, однако, как уже указывалось, такое упрощение принято для более понятного изложения основной проблемы.

Если под величиной  $S$  понимать затраты, связанные с созданием и содержанием корабля, а под  $E$  — ту "отдачу", или эффективность, которой корабль может достигнуть в решении поставленной перед ним задачи, то стремление обеспечить минимум величины  $g$  можно интерпретировать, как стремление создать корабль, отвечающий наименьшему значению затрат, приходящихся на единицу получаемого эффекта. В этом случае задача, обеспечиваемая нахождение ответа на вопрос, поставленный в рассматриваемом примере, может быть записана в виде системы

$$\left. \begin{aligned} g(\hat{D}_p, \hat{N}_p) &\leq g(D_p, N_p), \\ D_p &= F(N_p). \end{aligned} \right\} \quad (14.5)$$

Задача (14.5) отвечает задаче оптимизации тактико-технических характеристик корабля и решается методами теории оптимизации, о некоторых из которых будет говориться в последующих параграфах настоящей главы.

Принимая  $k_1 = 7,5$ ;  $k_2 = 1000$ ;  $k_3 = 5000$ ;  $P_p = 0,75$ ;  $\alpha_p = 4$  и воспользовавшись любым из существующих методов решения оптимизационных задач, получим решение системы (14.5) в виде оптимального значения числа пусковых установок на корабле  $\hat{N}_p = 8$  и оптимального значения водоизмещения корабля  $\hat{D}_p = 2420$  т., отвечающего значению  $\hat{N}_p$  (рис.14.1).

Почти повсеместно рассмотренная в примере задача оптимизации, усложненная и развитая в степени, необходимой для

адекватного представления проектируемого корабля, применяются в целях исследовательского проектирования.

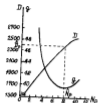


Рис. 34.1

Использование в качестве аппарата исследовательского проектирования задачи оптимизации позволяет в определенной степени формализовать основную задачу, стоящую при проектировании корабля, — задачу поиска удачного сочетания тактико-технических характеристик проекта. Главной особенностью такой задачи является наличие существенных противоречий между интересами тех или иных составляющих проектируемого корабля или его свойствами. Так, для повышения ударной мощи корабля необходимо увеличение массы комплекса ударного оружия и обслуживающих его систем (обнаружения, обслуживания, связи, энергоснабжения и т. д.), а для успешного решения задачи ударным комплексом следует обеспечить боевую устойчивость корабля, что, в свою очередь, требует увеличения массы бронирования, средств активной защиты (систем ПВО, ПЛО и т. д.). При рассмотрении свойств корабля проектант сталкивается с тем, что улучшение какого-либо одного свойства корабля, например вместимости, как правило, ухудшает какое-либо другое (другие), в данном случае водокте. Улучшение же одновременно всех свойств корабля в рамках основной задачи проектирования невозможно. Таким образом, речь идет о поиске компромисса между существующими противоречиями. Формализация задачи о нахождении такого компромисса в определенной степени осуществляется в виде задачи оптимизации. Так, в рассмотренном примере на формальной основе разрешается компромисс между затратами на создание и содержание корабля, растущими с увеличением полезной нагрузки, и эффектом, получаемым в результате реализации такой нагрузки. Вместе с тем, упомянутый подход

не позволяет исследовать механизм всего множества действующих противоречий, оказывающих существенное влияние на принятие проектных решений. Некоторые более эффективными механизмами решения компромиссных задач будут изложены в заключительных главах учебника.

Из рассмотренного примера можно видеть, что с вычислительной точки зрения задача оптимизации представляет собой приложение математического аппарата вариационных задач. Основные идеи вариационных задач в том виде, в котором они сейчас используются в исследовательском проектировании, были заложены в первой половине нашего века и получили методологическую завершенность в рамках теории исследования операций. Широкому применению этой теории способствовало внедрение в практику вычислений ЭВМ. По мере развития теории и распространения ее на все большее количество приложений, название "исследование операций", отвечающее первоначальному узкому смыслу, применительно к задачам обоснования проектных и технических решений стало постепенно уступать термину "теория оптимизации". Термин же "исследование операций" сегодня обычно применяется к задачам, связанным с оптимизацией способов действий или поведения. Параллельно с этим математически сформулированные задачи оптимизации начали объединяться под общим названием задач математического программирования.

Рассмотрим общую постановку задачи оптимизации тактико-технических характеристик (ТТХ) корабля и, прежде всего, используемые при этом переменные. Конечной целью исследовательского проектирования является получение оптимального сочетания ТТХ корабля на основании анализа оперативно-тактических, технических и экономических аспектов, связанных с его созданием и использованием в составе флота. При этом, под ТТХ понимается совокупность таких характеристик, которые непосредственно влияют на боевую эффективность корабля (например, состав оружия и вооружения с учетом их собственных характеристик, скорость полного хода корабля, его автономность, дальность плавания, главные размерения и т. п.), и характеристик, влияющих на показатели эффективности косвен-

но (например, конструкция и архитектура) тыл корпуса, тип и характеристики энергетической установки, электроэнергетической системы и т. п.).

Прежде чем приступить к постановке задачи оптимизации на всего множества (в общем случае бесконечного) ТТХ корабля, выделим некоторое ограниченное подмножество, выступающее в задаче оптимизации в качестве множества всех оптимизируемых переменных. Иногда это ограниченное подмножество называют множеством варьируемых переменных задачи, имея в виду, что каждая из рассматриваемых характеристик варьируется в определенном диапазоне изменения с целью поиска ее оптимального значения. Выбор для оптимизации тех или иных ТТХ корабля зависит от цели исследования и вычислительных возможностей. Можно сказать, что множество варьируемых переменных представлено такими ТТХ, которые интересуют проектанта с точки зрения их сочетания на проектируемом корабле. Сопоставим каждому набору значений, принимаемых элементами этого множества, некоторый вектор  $x$ , компонентами которого будут ТТХ корабля. Поскольку множество рассматриваемых в задаче ТТХ с нашей точки зрения полностью характеризует проектируемый корабль, то можно утверждать, что каждому значению вектора  $x$  соответствует свой вариант корабля, т. е. какого-то решение задачи. В связи с этим все множество значений вектора  $x \in \{X\}$  именуют множеством или областью решений задачи.

Если считать, что характеристики корабля, определяемые компонентами вектора  $x$ , варьируются независимо друг от друга, т. е. являются независимыми переменными, то необходимо рассмотреть также так называемые зависимые переменные, множество значений которых можно записать в виде  $\{Y\}$ . В качестве компонентов вектора  $y \in \{Y\}$  могут выступать водоизмещение корабля, некоторые главные размеры, составляющие нагрузки масс и т. п. Значение  $y$  полностью определяется заданием вектора  $x$ . В общем виде связь между этими переменными выражается следующим образом:

$$F: \{X\} \rightarrow \{Y\}, \quad (14.6)$$

где  $F$  — так называемая передаточная функция, или просто модель.

В рассмотренном в начале параграфа примере в качестве переменной  $x$  выступает полезная нагрузка,  $y$  — водоизмещение, а сама функция  $F$  имеет вид алгебраического выражения третьей степени. Таким образом, функция  $F$  представляет собой не что иное, как математическую модель корабля (ММК), а точнее, функциональное описание математической модели, так как остается открытым еще вопрос морфологического и информационного описаний. Цель построения ММК состоит в необходимости представления математического образа корабля в функционально содержательных терминах без несущественных особенностей. При этом, связь между переменными  $x$  и  $y$  может быть аналитической, как в рассмотренном нами примере, алгоритмической или даже нефункциональной. В последнем случае говорят о стохастическом, или мыслительном моделировании.

Следует отметить, что компонентами вектора  $x$  могут быть не только независимые варьируемые переменные, как это было принято ранее. В отдельных случаях задачи требуют рассматривать в качестве варьируемых переменных и некоторые зависимые переменные. Так, в нашем примере функция  $g$  зависит не только от переменной  $N_p$ , но и от  $D_p$ . Эта особенность не повлияет на справедливость дальнейших рассуждений, но может на затруднить, поэтому будем считать, что варьируются только независимые переменные, совокупность всех значений которых составляет множество  $\{X\}$ .

Прежде чем перейти непосредственно к записи задачи оптимизации, необходимо сделать еще одну оговорку. Если мы говорим о задаче оптимизации в смысле (14.5), то ей, разумеется, соответствует своя математическая модель. Она будет состоять из уже упомянутой ММК (14.6), или модели синтеза корабля (см. п. 1.2), моделей анализа (14.3 и 14.4) и некоторых преобразований, обеспечивающих постановку оптимизационной задачи (14.2, 14.5). Вся совокупность этих выражений также является математической моделью, но для определенности терминология в отличие от ММК, ее следует называть математической моделью оптимизации ТТХ корабля.

Для получения оптимального сочетания компонентов вектора  $x$  — конечной цели исследования — необходимо задать



задачу проектирования в терминах теории оптимизации, в соот-  
ветствии с которой задача оптимизации ТТХ корабля формули-  
руется следующим образом.

Пусть множество  $\{X\}$  задано в положительном подпро-  
странстве  $l$ -мерного евклидова пространства  $E^l$  (действительно-  
векторное пространство с заданным на нем скалярным произве-  
дением — для введения метрики, называется евклидовым),  
 $g: \{X\} \times \{Y\} \rightarrow \{Z\}$  — функция качества или целевая функция  
задачи;  $\{Y\}$  — множество оценок состояний корабля, которое  
предполагается линейно или частично упорядоченным отноше-  
нием  $\leq$ . Учитывая (14.6), функцию  $g$  можно представить в виде

$$g(x) = g(x, P(x)). \quad (14.7)$$

Для данного подмножества  $\{X'\} \subseteq \{X\}$  требуется найти та-  
кое  $\bar{x} \in \{X'\}$ , что

$$g(\bar{x}) \leq g(x), \quad \forall x \in \{X'\}. \quad (14.8)$$

Здесь множество  $\{X\}$  называется множеством решений, множе-  
ство  $\{X'\}$  — множеством допустимых решений. Сужение мно-  
жества  $\{X\}$  обусловлено необходимостью удовлетворить системе  
ограничений, обеспечивающих содержательность ММК.

В этих терминах задача оптимизации задается тройкой

$$(F, g, \{X'\}). \quad (14.9)$$

Решением задачи оптимизации, заданной тройкой (14.9), на-  
зывается элемент  $\bar{x} \in \{X'\}$ , удовлетворяющий условию (14.8) и  
представляющий собой  $l$ -мерный вектор с компонентами — оп-  
тимальными значениями ТТХ корабля. Естественно, что знак  $\leq$   
в (14.8) всегда может быть заменен на знак  $\geq$ .

Как правило, функцию  $g(x)$  называют также критерием оп-  
тимальности, определяя ее как количественную меру качества  
варианта корабля, образующегося в каждой точке варьирования  
ТТХ. Существует мнение, согласно которому под критерием по-  
нимают совокупность условий, определяющих решение зада-  
чи. В частности, в случае отсутствия условий, ограничивающих  
область решения задачи, т. е. когда  $\{X'\} = \{X\}$ , под критерием  
оптимальности подразумевают само условие (14.8) в точке  $\bar{x}$ .

В интересах сокращения вводимых понятий мы будем придержи-  
ваться первого определения критерия оптимальности. При  
этом понятия "целевая функция", "функция качества" и "кри-  
терий" будут рассматриваться как тождественные.

С методологической точки зрения введение в рассмотрение  
критериальной функции означает установление соответствия  
между качественной шкалой предпочтения на альтернативных  
вариантах решения задачи, в данном случае вариантах кораблей,  
и количественными значениями целевой функции, вычислитель-  
ными относительно каждого из этих вариантов. Вообще говоря,  
такое соответствие не может быть справедливым, так как между  
качественными и количественными категориями не существует  
адекватного перехода. Иля, другими словами, качество состоя-  
ния объекта может быть адекватно описано только бесконечным  
числом количественных характеристик. В то же время, мы не  
знаем другого способа формализации оценок, кроме как с по-  
мощью количественных показателей. Значит речь может идти  
только о допустимой степени этой неадекватности.

Особое место при постановке задачи оптимизации занимает  
процедура выделения подмножества  $\{X'\}$  допустимых решений  
задачи из множества  $\{X\}$  всех решений. В общем виде система  
ограничений, определяющая границы множества  $\{X'\}$ , пред-  
ставляет собой совокупность ограничений, накладываемых на  
область изменения независимых переменных  $x$  (так называемых  
тривиальных ограничений), и ограничений, накладываемых на  
область изменения функции  $F$  (функциональных ограничений).  
В этом случае систему ограничений можно записать в виде

$$\left. \begin{aligned} x_i &\leq x_{i0}, \quad \forall x \in \{X\}, i \in \{I\}; \\ y_j &\leq y_{j0}, \quad \forall y \in \{Y\}, j \in \{J\}. \end{aligned} \right\} \quad (14.10)$$

Принимая во внимание, что функция  $F$  всегда предполагается  
однозначной, система (14.10), описываемая ограничения зада-  
чи, полностью обеспечивает выделение из множества  $\{X\}$   
подмножества  $\{X'\}$ .

Само множество  $\{X\}$  может быть задано либо в виде дискретного конечного набора векторов  $x$  (т. е. задано конечное число вариантов корабля), либо в виде непрерывного замкнутого ограниченного множества значений варьируемых компонентов вектора  $x$ . (Возможен и смешанный случай [381].)

В первом случае в  $l$ -мерном евклидовом пространстве множество  $\{X\}$  представляется в виде некоторой совокупности дискретных точек (рис. 14.2, а). Во втором случае множество  $\{X\}$

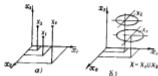


Рис. 14.2

может быть представлено в виде объединения  $(l-1)$ -мерных множеств  $\{X_p\}$ ,  $p \in I^l$ , где  $I^l$  — множество возможных наборов значений дискретно варьируемых компонентов вектора  $x$ , а  $l$  — число этих компонентов ( $0 \leq l \leq l$ ). На рис. 14.2, б схематично показан вид множества  $\{X_p\}$  для трехмерного случая, когда имеется один дискретный компонент  $x_1$ , принимающий два значения, и два непрерывных компонента  $x_2$  и  $x_3$ .

При дискретном способе задания множества  $\{X\}$  оптимальные характеристики корабля называют сравнительной оценкой вариантов, при непрерывном — оптимальной в пространстве ТТХ корабля. Здесь необходимо отметить, что дискретное представление множества  $\{X\}$  актуально только для существования дискретных переменных, под которыми понимаются переменные с шагом квантования, превосходящим по величине шаг варьирования переменной в результирующем алгоритме ЭВМ. В дальнейшем все рассуждения будут вестись применительно к непрерывному множеству  $\{X\}$ .

С математической точки зрения решение задачи оптимизации достигается при выполнении условия (14.3) безотносительно к смыслу, вкладываемому в функции  $g$  и  $F$ . Однако с проектной точки зрения этот вопрос не может нас не интересовать.

Из примера, приведенного в начале параграфа, можно видеть, что основной задачей, решаемой при проектировании, является поиск компромисса между различными свойствами корабля. Необходимость компромиссного решения обусловлена тем обстоятельством, что получить достаточно высокие характеристики всех основных свойств на проектируемом корабле невозможно в силу противоречивости большинства таких свойств. В связи с этим главным содержанием задачи оптимизации, в результате решения которой формируется предпочтительный вариант корабля, будет процесс разрешения противоречий между его основными свойствами. Для того чтобы прояснить, всякая ли задача оптимизации отвечает этому содержанию, проведем следующие рассуждения. Пусть все пространство значений вектора  $x$   $n$ -мерно и с помощью некоторой абстрактной координатной оси — оси абсцисс, тогда график функции  $g(x)$  можно представить в виде графика одномерной функции. Рассмотрим подробнее причины, заставляющие проектанта прибегнуть к задаче оптимизации. Каждой точке на оси  $x$  соответствует набор ТТХ корабля определенного варианта и некоторое значение функции качества  $g(x)$ . Чем меньше значение функции  $g(x)$ , тем сравнительно предпочтительнее рассматриваемый вариант корабля. При проектировании любого корабля не исключает никаких сомнений тот факт, что варианты, отвечающие значениям  $x = 0$ ;  $x = \infty$ , создать невозможно, да и нецелесообразно. Более того, существует заранее известная область изменения значений вектора  $x$ , в которой предполагается нахождение оптимального сочетания ТТХ. Как бы ни была велика эта область, границы ее, определенные тривиальными ограничениями, всегда лежат внутри промежутка  $x = (0, \infty)$ . Для выбора внутри области допустимых решений (ОДР) предпочтительного варианта проектанту необходимо учесть некоторые существенные факторы, характеризующие облик корабля и зависящие от значения  $x$ . Чем меньше таких факторов, тем проще задача, однако если для рас-

смотренная будет оставлена только один какой-либо фактор, монотонно зависящий от  $x$ , например стоимость создания корабля, то решение будет тривиальным — всегда на левой границе множества  $\{X^d\}$ , а в случае ее отсутствия — при  $x = 0$ . Для решения такой задачи нет необходимости исследовать ОДР, достаточно решить систему

$$\left. \begin{aligned} g(\hat{x}) &\leq g(x), \\ f(\hat{x}) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (14.11)$$

где  $f(\hat{x}) = 0$  — граничное условие слева.

Сведение задачи поиска компромиссной точки в ОДР к задаче поиска ее непосредственно на границе незначительно обедняет решение, однако не выполняет задачу полностью при условии, что уравнение  $f(x) = 0$  можно рассматривать как некоторое противоречие фактору, заложенному в целевую функцию. Так, если в качестве функции  $g$  рассматривать все ту же стоимость создания корабля, накладывая при этом условие сохранения показателем эффективности значения, не менее заданного, то вариационный характер задачи сохраняется, так как получить одно и то же значение показателя эффективности можно путем создания различных по стоимости кораблей. Сохраняется в этом случае и возможность получения компромисса. Если же граница ОДР была установлена только затем, чтобы определить область поиска решения (что случается довольно часто), решение задачи теряет смысл.

Задача выбора оптимального варианта наполняется новым содержанием при введении в рассмотрение еще хотя бы одного фактора, влияющего на вид функции  $g$ . При этом решение будет конструктивным только тогда, когда на одной достаточно удаленной границе очевидно доминирует один из рассматриваемых факторов, а на другой — второй. Иными словами, в задаче проектирования оптимальный вариант должен отвечать некоторому компромиссу между рассматриваемыми факторами. В случае включения хотя бы двух факторов в целевую функцию количественная мера этого компромисса определяется при удовлетворении условию (14.8), которое для дифференцируемой функции  $g(x)$  примет вид

$$\nabla g(x) = 0, \quad \forall x \in \{X^d\}, \quad (14.12)$$

где  $\nabla$  — дифференциальный оператор, равный

$$\nabla = \left\{ \frac{\partial}{\partial x_1}, \frac{\partial}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial}{\partial x_n} \right\}^T. \quad (14.13)$$

Такие два фактора (показатели  $S$  и  $E$ ) были рассмотрены в нашем примере. При этом можно видеть, что целевая функция в приведенном примере отвечает следующим граничным условиям:  $g(0) = g(x) = \infty$ , т. е. заведомо не удовлетворяет условию оптимальности на достаточно удаленных границах (см. рис. 14.1).

Ужесточение ограничений, т. е. сильное сужение множества  $\{X\}$ , заставляет предположить возможность отсутствия экстремальной точки, отвечающей условию (14.12), внутри ОДР, и тогда в более широком смысле условие (14.8) может быть записано следующим образом:

$$g(\hat{x}) = \inf g(x), \quad \forall x, \hat{x} \in \{X^d\}. \quad (14.14)$$

Но и в данном случае задача оптимизации ТТХ корабля продолжает сохранять то внутреннее противоречие свойств, на базе которого ипotesis компромиссное решение.

При формировании целевой функции возможно заложить в нее и большее число влияющих факторов, чем два. При этом возникает опасность получения нескольких экстремумов функции  $g$  так, что условию (14.12) будет отвечать не один вектор  $\hat{x}$ , а несколько. С точки зрения удовлетворения условию (14.8) единственность решения задачи сохраняется, однако комбинировать множество решений с точки зрения разрешения компромисса между действующими противоречивыми факторами уже затруднительно.

Общая отмеченные особенности, можно сказать, что при постановке компромиссной задачи внимание проектиста должно быть акцентировано на выявлении внутренних противоречий, характерных для свойств создаваемого корабля. При постановке же задачи оптимизации удовлетворительным будет всякое решение, обеспечивающее выполнение условия (14.8). Таким образом, компромиссная задача является в некотором смысле частным случаем математической задачи оптимизации.

#### 14.2. КРИТЕРИИ ТИПА "СТОИМОСТЬ — ЭФФЕКТИВНОСТЬ". ВЫПУСКНОЙ АНАЛИЗ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ

Одним из наиболее важных этапов решения задачи оптимизации ТТХ корабля является выбор критерия оптимальности  $g$ , выполнение для которого условия  $g(\hat{x}) = \inf g(x)$ , для любых  $x, \hat{x}$  из  $\{X'\}$  обеспечит получение оптимального вектора  $\hat{x}$  варьируемых переменных.

Поскольку корабль создается с какой-то определенной целью, то любой критерий, с помощью которого возможно было бы провести анализ математической модели корабля (ММК) в интересах выбора предпочтительного варианта, должен характеризовать степень достижения кораблем поставленной перед ним цели. В соответствии с основной идеей военно-экономического анализа, целью создания любой военно-технической системы является предпочтительное соотношение между эффективностью системы и затратами, связанными с обеспечением этой эффективности. Критерии, отвечающие этим требованиям, получили название критериев "стоимость — эффективность". Различают следующие типы этих критериев.

1. Оптимизация показателя эффективности при ограничении на ресурсный показатель, т. е. показатель затрат:

$$\left. \begin{array}{l} \sup E(x); \\ S(x) \leq S_0; \\ x \in \{X'\}. \end{array} \right\} \quad (14.15)$$

где  $S_0$  — заданная величина ресурсного показателя;  $E(x)$  — такой показатель эффективности, большому значению которого соответствует корабль большей эффективности.

Применение критерия этого типа не позволяет оценить приращение эффективности корабля за пределами наложенного на ресурсный показатель ограничения. Следовательно, критерий первого типа целесообразно использовать только в том случае, когда ограничение на ресурсный показатель входит непосредственно в граничные условия задачи, т. е. является априорным. В практике проектирования принято считать, что формирование оптимального варианта проекта по первому типу критерия со-

ответствует контрактному способу заказа кораблей, в наибольшей степени получившему распространение в США. В соответствии с условиями этого способа предполагается проектирование корабля вести в рамках жестко установленной стоимости контракта. Однако фактически этот подход в чистом виде никогда реализовать не удастся.

2. Оптимизация ресурсного показателя при ограничении на показатель эффективности:

$$\left. \begin{array}{l} \inf S(x); \\ E(x) \geq E_0; \\ x \in \{X'\}. \end{array} \right\} \quad (14.16)$$

где  $E_0$  — заданная величина показателя эффективности.

Значение  $E_0$  в задаче исследовательского проектирования довольно часто можно определить из соображений, выходящих за рамки задачи оптимизации. Однако обоснованность таких нормативных ограничений всегда вызывает сомнения. Действительно, можно ли рассчитывать на то, что найдется хотя бы одно сочетание ТТХ корабля, обеспечивающее ему решение поставленной задачи с уровнем эффективности не менее заданной, если при формировании требований к эффективности не учитывались научно-технические, производственные и экономические возможности страны? Несмотря на это, создание корабельного состава флота "исходя из стоящих перед флотом задач" достаточно широко распространено особенно в оперативно-тактической области. Бесспорным является то, что вся работа по созданию корабельного состава должна быть подчинена тем задачам, которые возлагаются на Военно-Морской Флот, однако невозможность представить все многообразие функционального проведения военного флота как сложного организма в рамках одного боевого сценария, обеспечивающего вычисление показателя эффективности, и необходимость учета экономических и производственных ограничений уже на этапе формирования задач флота заставляет относиться к использованию критерия второго типа с большой осторожностью.

3. Оптимизация отношения показателя эффективности к ресурсному показателю (или наоборот)

$$\max E(x)/S(x) \text{ или } \min S(x)/E(x). \quad (14.17)$$

В отдельных работах показывается, что критерии первого и второго типов полностью идентичны, т. е.  $S_{\text{оп}}(E_0)$  и  $E_{\text{оп}}(S_0)$  взаимно однозначно определяют друг друга.

Что касается третьего типа критерия "стоимость—эффективность", который уже рассматривался в примере в предыдущем параграфе, то в ряде работ высказываются различные мнения о целесообразности его использования. При этом значительная часть авторов сходится во мнении, что при использовании этого типа критерия конструктивного решения задачи может не существовать. Иными словами, если критерий первого и второго типов всегда обеспечивают нахождение решения, хотя бы за счет получения его на границе, то критерий третьего типа, взятый без каких-либо ограничений, таит в себе опасность сведения решения на границе интервала  $[0, \infty]$ . С качественной точки зрения это означает, что при использовании критерия в виде простого отношения показателей стоимости и эффективности результатом решения задачи оптимизации может стать или бесконечно маленький корабль (этот случай иногда упоминается в литературе как парадокс "китайских джозек"), или наоборот, бесконечно большой (парадокс "сверхлинкоров"). Оба этих случая с проектной точки зрения не могут считаться удовлетворительными, так как в первом случае оказывается, что лучше всего не начинать строительство корабля вообще, а во втором — наиболее рационально все средства, выделяемые на новое строительство флота (сколько бы их не было выделено), направить на создание одного единственного корабля.

Несмотря на это, в практике проектирования критерий третьего типа получил самое широкое применение (удельные приведенные затраты, объем производимой работы, приходящейся на единицу затрат, стоимость решения боевой задачи, стоимость добычи одной тонны сырья или продукции и т. п.). В качестве основного достоинства критерия третьего типа следует отметить

отсутствие необходимости априорного задания значений  $E_0$  и  $S_0$ , которые могут быть не всегда известны.

Воспользовавшись ранее приведенными рассуждениями, можно также сказать, что поскольку критерий третьего типа включает в себя оба противоречивых фактора:  $E$  и  $S$ , то следует ожидать, что этот критерий в большей степени будет отвечать содержанию комплексной задачи, чем критерий первого и второго типов.

Сравнивая критерии всех трех типов, нетрудно заметить, что критерий третьего типа является общим случаем первых двух. Действительно, всякое число, в данном случае конкретное значение  $E_0$  или  $S_0$ , всегда можно представить в виде вырожденной функции  $E(x)$  или  $S(x)$  с хотя бы одним значением в точке  $x$  таким, что

$$E(x) = E_0;$$

$$S(x) = S_0.$$

Для решения вопроса о возможности применения критерия третьего типа целесообразно рассмотреть эту проблему с точки зрения задачи оптимизации.

Как станет известно из последующих параграфов настоящей главы, получение углового решения задачи оптимизации на границе ОДР, т. е. отсутствие решения внутри ОДР при расширении ее до достаточно больших размеров, является результатом постановки задачи невыпуклого программирования. Таким образом, вопрос получения тривиальных решений задачи оптимизации ТТХ корабля при использовании критерия третьего типа сводится к вопросу о выпуклости задачи.

Под задачей выпуклого программирования мы понимаем такую задачу невыпуклого программирования, когда целевая функция модели выпукла, а все ограничения, накладываемые на задачу — выпуклы (см. п. 14.3). Свойства выпуклого программирования заключаются в том, что при такой постановке задачи существует только один экстремум целевой функции и он совпадает с решением задачи (свойство унимодальности). Постановка задачи выпуклого программирования облегчает нахождение точки оптимума. Необходимые и достаточные условия суще-

ствования одной точки экстремума в выпуклой задаче известны как условия Куна—Таккера.

Как уже говорилось, постановка задачи выпуклого программирования в нашем случае необходима для обеспечения возможности применения критерия "стоимость—эффективность" третьего типа. Поскольку обеспечение выпуклости ограничений практически трудностей обычно не вызывает (задачи исследовательского проектирования, как правило, сами нацелены на обоснование тех или иных ограничений, которые используются на более поздних этапах создания корабля. Поэтому на этапе исследовательского проектирования ограничения или не используются вообще, или представлены небольшим числом тривиальных ограничений, которые удовлетворяют любым требованиям выпуклости), то для решения поставленной задачи необходимо провести выпуклый анализ функции вида

$$g(x) = S(x)E(x), \quad x \in (X). \quad (14.18)$$

(Выпуклый анализ — самостоятельный раздел прикладной математики, изучающий свойства выпуклых функций с целью обеспечения корректности решений экстремальных задач [407].)

#### *Функция показателя эффективности*

С точки зрения вида функции показателя эффективности принятое в качестве такого показателя вероятности решения задачи или математического ожидания достигаемых результатов, как это было показано в предыдущей главе учебника, не имеет значения, так как совершенствование корабля в рамках принятой проектной схемы за счет улучшения его характеристик связано с общим процессом развития техники и определяется теми же закономерностями.

Обращаясь к постановке задачи, всегда можно представить такое единственное сочетание независимых переменных  $x \neq 0$ , при котором базовая эффективность корабля будет равна нулю, т. е. потребуем, чтобы существовало такое значение  $x_{min} \in (X)$ , для которого

$$E(x_{min}) = 0. \quad (14.19)$$

С увеличением любой из независимых переменных, т. е. с увеличением затрат в корабль, его показатель эффективности должен монотонно расти (в противном случае принятую проектную схему следует считать порочной). С другой стороны, любая принятая проектная схема имеет вполне определенную наибольшую возможную эффективность, при достижении которой корабль, созданный по такой схеме, полностью исчерпывает свои потенциальные возможности. Иллюстрируя соображения, позволяющие считать, что функция показателя эффективности корабля для достаточно широкого круга задач должна отвечать следующим начальным и граничным условиям:

$$\begin{aligned} E(x_{min}) &= 0; \\ E(x) &= E_0; \end{aligned} \quad (14.20)$$

$$E(x) > 0; \quad \forall E(x) \geq 0; \quad x \in (X); \quad x_{min} \geq 0.$$

При этом функция  $E(x)$  может быть вознута на всем рассматриваемом промежутке или выпуклой на начальном участке с точкой перегиба. Исходя из общей картины непрерывного наращивания независимых характеристик корабля при неизменности принятой проектной схемы, будем считать, что если такая точка существует, то она единственная. Кроме того, всегда можно предполагать, что функция  $E(x)$  непрерывна или имеет конечное число разрывов первого рода.

#### *Функция ресурсного показателя*

Как уже отмечалось, на этапе исследовательского проектирования как правило рассматриваются только стоимостные ресурсные показатели. Функция ресурсного показателя строится таким образом, чтобы дать наиболее достоверный прогноз по затратам на создание и содержание корабля и связать значение ресурсного показателя с варьируемыми переменными ММК.

Определяя начальные и граничные условия функции ресурсного показателя, всегда можно считать, что выполняется условие

$$S(0) = 0. \quad (14.21)$$

Учитывая, что всякое увеличение значений технических характеристик корабля влечет за собой рост затрат, с достаточной адекватностью можно полагать, что

$$\forall S(x) > 0. \quad (14.22)$$

Аналогично функции  $E(x)$  можно считать, что  $S(x)$  непрерывна на  $\{X\}$  или имеет конечное число разрывов первого рода.

Если предположить, что на начальном участке функция стоимости растет линейно, то, начиная с некоторых значений  $x$ ,  $S(x)$  будет расти со все возрастающей интенсивностью. Действительно, начиная с некоторого значения, принимаемого, например, такой характеристикой, как водоизмещение, затраты на создание и содержание корабля, помимо предусмотренных ранее составляющих, линейно зависящих от водоизмещения, станут включать дополнительные средства, необходимые для увеличения мощности станций, обеспечивающих строительство более крупных кораблей, расширения производства, выполнения дополнительных работ, обеспечивающих условия базирования, ремонта и докования корабля. Таким образом, можно считать, что функция ресурсного показателя  $S(x)$  не просто монотонна, но и выпукла.

При этом, начальные и граничные условия функции  $S(x)$  могут быть записаны в виде:

$$\begin{aligned} S(x_{\min}) &= S_0; \\ S(\infty) &= \infty; \end{aligned} \quad (14.23)$$

$$S'(x) > 0; \quad \forall S(x) > 0; \quad \forall^1 S(x) > 0; \quad x_{\min} > 0; \quad x \in \{X\},$$

где  $\forall^1 S(x) > 0$  означает, что гессинан вида

$$\nabla^2 S(x) = \begin{vmatrix} \partial^2 S / \partial^2 x_1, \dots, \partial^2 S / \partial x_n \\ \dots \\ \partial^2 S / \partial x_n \partial x_1, \dots, \partial^2 S / \partial^2 x_n \end{vmatrix}$$

положительно определен для всех  $x \in [0, \infty)$ .

Зная граничные и начальные условия функций  $E(x)$  (14.20) и  $S(x)$  (14.23), выполним выпуклый анализ их отношения  $g(x) = S(x)/E(x)$ .

Первая и вторая производные этого отношения примут вид (считается, что все рассматриваемые функции дважды дифференцируемы)

$$\begin{aligned} \nabla g &= (EVS - SE'E)E^{-2}; \\ \nabla^2 g &= ((E^2V^2S - SE^2E^2)E^{-4} - E(EVS - SE'E) \cdot \\ &\quad \times \nabla^2 E - E^2E(EVS - SE'E)^2)E^{-6}. \end{aligned} \quad (14.24)$$

Необходимым и достаточным условием выпуклости функции, как известно, является выполнение условия положительной определенности гессинана:

$$\nabla^2 g > 0, \quad x \in [x_{\min}, \infty). \quad (14.25)$$

Так как  $E > 0$ , то из условия  $\nabla^2 g > 0$  и (14.24) следует, что

$$(E^2V^2S - SE^2E^2)E^{-4} - E(EVS - SE'E)\nabla^2 E - E^2E(EVS - SE'E)^2 > 0.$$

Если в рассматриваемом промежутке существуют только такие стационарные точки, в которых выполняется условие (14.25), то задача будет отвечать требованиям задачи выпуклого программирования, т. е. функция  $g$  будет унимодальна (условие выпуклости функции  $g$  в каждой точке рассматриваемого промежутка является более жестким и в данном случае избыточным).

Рассмотрим выполнение этого условия для случая, когда  $\nabla^2 E < 0$ :

$$(E^2V^2S - SE^2E^2)E^{-4} > 0. \quad (14.26)$$

Так как  $E > 0$ ;  $\nabla^2 S > 0$ ;  $S > 0$ ;  $\nabla^2 E < 0$ , то неравенство (14.26) справедливо.

Сложнее показать, что в случае, когда на начальном участке изменения функция показателя эффективности становится выпуклой ( $\nabla^2 E > 0$ ) и образует точку перегиба при переходе на конгунный участок, обеспечивающий области ее насыщения, критерийная функция  $g$  сохраняет унимодальность. В работе [137] этот

факт доказывается при введении несильного дополнительного условия, имеющего ясную проективную интерпретацию.

Таким образом, все полученные результаты показывают, что критерий "стоимость—эффективность" третьего типа отвечает компромиссному характеру проектной задачи и при выполнении условий (14.20) и (14.23) унимодален, что обеспечивает содержательное решение в рамках задачи выпуклого программирования.

### 14.3. КЛАССИФИКАЦИЯ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ И МЕТОДОВ ИХ РЕШЕНИЯ. АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Для систематического изложения методов решения задач оптимизации необходимо ввести классификацию этих задач. Такая классификация предложена в [369] (рис. 14.3). В соответствии с этой классификацией задачи оптимизации различают.

1. С точки зрения изменения независимых переменных во времени на статические и динамические. К статическим относят задачи оптимизации, в которых поведение системы описывается алгебраическими уравнениями, а результатом решения является вектор оптимальных значений варьируемых переменных. Если же поведение системы, или моделируемый процесс описывается дифференциальными уравнениями (системой дифференциальных уравнений), а решением является функция с оптимальными параметрами, то говорят о динамической задаче оптимизации. Можно сказать, что в динамической задаче оптимизации требуется описать в  $t$ -мерном пространстве траекторию, удовлетворяющую наложенным ограничениям, при движении вдоль которой достигается наименьшее (наибольшее) значение целевой функции.

2. В соответствии с тем, учитываются или не учитываются в системе случайные воздействия, задачи оптимизации делятся на стохастические и детерминированные.

3. По виду функций, описывающих ограничения, и виду целевой функции (функций) статические задачи оптимизации делятся на линейные и нелинейные. Если хотя бы одна из функций ограничений или целевых функций является нелинейной, то соответствующая задача оптимизации называется нелинейной.

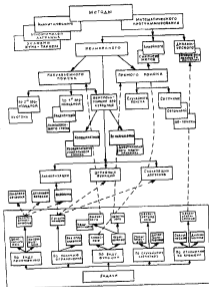


Рис. 14.3



В том случае, когда задача оптимизации ТГХ корабля сведена к нахождению экстремального (супремального) значения одной целевой функции на области допустимых решений, существуют различные пути решения этой задачи. Причиной существования различных методов оптимизации является различное представление целевой функции и ограничений, определяющих область допустимых решений. В зависимости от вида целевой функции и функций, описывающих ограничения, мы разделим задачи оптимизации на линейные и нелинейные. Рассмотрим методы их решения.

С вычислительной точки зрения выделены из всех методов решения задач оптимизации аналитические методы, под которыми будем понимать методы, использующие классический аппарат дифференциального и вариационного исчисления. Остальные методы решения задач оптимизации определяются как численные (поисковые) методы, решение задач которыми осуществляется с помощью итерационных процедур.

Численные методы решения задач оптимизации получили название методов математического программирования. Они появились как инструмент оптимального распределения ограниченных ресурсов и сегодня составляют основу вычислительной базы теории оптимизации.

Различают методы линейного, нелинейного и динамического программирования:

Методы линейного программирования. Эти методы используются применительно к линейным задачам оптимизации или к задачам, которые могут быть линеаризованы.

Методы нелинейного программирования. Используются для решения нелинейных задач оптимизации. Для решения нелинейных задач могут быть использованы также уже упоминавшиеся аналитические методы, однако гораздо чаще приходится прибегать к специальным поисковым методам, которые порой содержат многие идеи и приемы аналитических методов. В связи с этим, аналитические методы обычно рассматривают не в качестве вычислительного аппарата, как например, численные методы, а как теоретический аппарат, с которого

важно иметь представление, так как во многих областях он составляет основу проводимого теоретического анализа.

Среди нелинейных задач оптимизации большой интерес представляют задачи, в которых для одной локальной экстремум целевой функции является одновременно (глобальным (свойство унимодальности)). Подобные задачи получили название задач выпуклого программирования (точно также можно говорить о задаче вогнутого программирования). Иногда методы решения задач выпуклого программирования называют методами направленного поиска.

В отличие от этих методов, наиболее эффективными методами решения задач невыпуклого программирования являются методы случайного поиска.

Среди нелинейных задач оптимизации различают также задачи, в которых рассматривается процесс, развивающийся во времени и естественно распадающийся на ряд "шагов" или "этапов". С точки зрения изменения независимых переменных во времени эти задачи относятся к динамическим задачам оптимизации. Методы решения этих задач получили название методов динамического программирования. Следует отметить, что метод динамического программирования может быть применен не только к динамическим задачам, но и к очень большому кругу других задач.

Рассмотрим подробнее упомянутые методы.

#### **Аналитические методы**

В связи с тем, что задачи оптимизации ТГХ корабля имеют, как правило, большое число независимых переменных, т. е. многомерны, возможности применения аналитических методов в задачах исследовательского проектирования довольно ограничены. Сегодня нельзя назвать ни одной практической задачи, решенной каким-либо аналитическим методом. Вместе с тем, как уже отмечалось, ценность аналитических методов заключается в их методологической базе, объединяющей большинство методов и подходов к решению вариационных задач.

## Теоретические основы аналитических методов

Задача оптимизации считается поставленной, если она сформулирована в терминах функционального анализа и целевая функция, отвечающая цели создания оптимизируемой системы, известна и может быть вычислена в любой точке пространства варьируемых переменных.

В этом случае решение задачи оптимизации сводится к поиску экстремальной точки (минимальной или максимальной) целевой функции с учетом действующих ограничений. Для того, чтобы рассмотреть существующие методы поиска стационарных точек целевой функции, необходимо вспомнить некоторые свойства функций вообще.

Как правило, в исследовательском проектировании мы имеем дело с функциями нескольких действительных переменных. Область определения таких функций — подмножество в  $E^n$ . Точку, которой в декартовой системе координат соответствует последовательность  $(x_1, \dots, x_n)$ , обозначают  $x = (x_1, \dots, x_n)$ .

Пусть  $A \subset E^n$  и  $B \subset E$ . Однозначное отображение  $f$  множества  $A$  в множество  $B$  называется (действительной) функцией в действительных переменных. Множество  $A$  называется областью определения  $f$ . Число  $f(x, \dots, x_n)$  называется значением функции в точке  $x = (x_1, \dots, x_n)$ . Множество  $\{f(x) | x \in A\} \subset E$  называется множеством значений  $f$ .

Свойства целевых функций, необходимые нам для последующего анализа, рассмотрим на примерах функций одной переменной, т. е. рассматривается одна независимая переменная  $x$  и одна зависимая переменная  $y$ , связанная с переменной  $x$  посредством функции  $f$  так, что  $y = f(x)$ .

Мы можем определить соответствие, с помощью которого каждой точке  $x \in E$  приписывается единственное числовое значение. Такое соответствие называется скалярной функцией  $f$ , определенной на множестве  $E$ . Когда множество  $E$  является евклидовым, мы имеем дело со всюду определенной функцией одной переменной.

Различают непрерывные и разрывные целевые функции (функция непрерывна на множестве, если она непрерывна в каж-

дой точке. Функция непрерывна в точке, если существует предел функции в этой точке  $x_0$ , равный  $f(x_0)$ , т. е.  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = f(x_0)$ ).

Функция непрерывна только тогда, когда она непрерывна как справа, так и слева  $f(x) \begin{cases} 1 & \text{при } x \geq 0 \\ 0 & \text{при } x < 0 \end{cases}$  — непрерывна в точке  $x_0 = 0$  справа, но не слева).

Различают точки устранимого и конечного разрыва (разрыва 1-го рода), бесконечного разрыва (разрыва 2-го рода). Считается, что в задачах последовательного проектирования всегда можно обеспечить непрерывность целевой функции, имея, однако, при этом в виду, что в ЦЭВМ осуществляется итерационный процесс вычисления функции с заданным шагом, что само по себе предусматривает наличие разрыва 1-го рода.

Возможны также случаи, когда переменные принимают существенно дискретные значения.

Кроме того, можно отметить также некоторые топологические свойства целевой функции.

Монотонность. Функция  $f(x)$  является монотонной (как при возрастании, так и при убывании), если для двух произвольных точек  $x_1$  и  $x_2$ , таких, что  $x_1 \leq x_2$ , выполняется одно из следующих неравенств:

$$f(x_1) \leq f(x_2) \text{ (монотонно возрастающая);}$$

$$f(x_1) \geq f(x_2) \text{ (монотонно убывающая).}$$

Если функция достигает своего минимума в точке  $x = x^*$  и монотонна по обе стороны от точки  $x^*$ , то такая функция унимодальна.

Глобальные и локальные минимумы. Функция достигает своего глобального минимума в точке  $\hat{x}$ , если:  $g(\hat{x}) \leq g(x)$ ,  $x \in \{X\}$  и локального минимума в точке  $x^*$ , если:  $g(x^*) \leq g(x)$  для всех  $x$ , удаленных от  $x^*$  на расстояние, меньшее  $\epsilon$ , т. е. если существует  $\epsilon > 0$ , такое, что для  $x$ , удовлетворяющих  $|x - x^*| < \epsilon$ , выполняется неравенство  $g(x^*) \leq g(x)$ .

Стационарной точкой называется точка  $\hat{x}$ , в которой

$$\nabla g(\bar{x}) = 0, \text{ где } \nabla = \begin{vmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} \\ \dots \\ \frac{\partial}{\partial x_n} \end{vmatrix}.$$

**Теорема.** Пусть в точке  $\bar{x}$  первые  $(n-1)$  производные обращаются в 0, а производная порядка  $n$  отлична от нуля.

1. Если  $n$  — нечетное, то  $\bar{x}$  — точка перегиба.
2. Если  $n$  — четное, то  $\bar{x}$  — точка локального оптимума.

Кроме того, если эта производная положительна, то  $\bar{x}$  — минимум; если отрицательна — максимум.

Существует понятие условного минимума и максимума (на границе) (информальное и супремальное значения).

Признаком наличия минимума многомерной функции является положительная полуопределенность гессована функции в этой

$$\nabla^2 g(x) = \begin{vmatrix} \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial^2}{\partial x_n \partial x_1} & \dots & \dots & \frac{\partial^2}{\partial x_n^2} \end{vmatrix}.$$

Из линейной алгебры известно, что для заданной квадратичной формы  $Q(x) = x^T A x$ :

$A$  — положительно определенная матрица, если  $Q(x) > 0$  для любых  $x$ .

$A$  — положительно полуопределенная матрица, если  $Q(x) \geq 0$ ;

$A$  — отрицательно определенная матрица, если  $Q(x) < 0$ ;

$A$  — отрицательно полуопределенная матрица, если  $Q(x) \leq 0$ ;

$A$  — неопределенная матрица, если  $Q(x) > 0$  для некоторых  $x$  и  $Q(x) < 0$  для остальных  $x$ .

## Метод множителей Лагранжа

Это классический аналитический метод, позволяющий искать точку оптимума в задаче при наличии ограничений, т. е. решать задачу условной оптимизации, как задачу нахождения безусловной стационарной точки некоторой другой функции. Таким образом, задача с ограничениями преобразуется в эквивалентную задачу безусловной оптимизации, в которой фигурируют некоторые неизвестные параметры, называемые множителями Лагранжа.

Рассмотрим задачу минимизации функции переменных с учетом одного ограничения в виде равенства

$$\begin{cases} \min g(x); \\ h_1(x) = 0 \end{cases} \quad (14.27)$$

В соответствии с методом множителей Лагранжа эта задача преобразуется в следующую задачу безусловной оптимизации

$$\min L(x, \lambda) = g(x) - \lambda h_1(x). \quad (14.28)$$

Функция  $L(x, \lambda)$  называется функцией Лагранжа,  $\lambda$  — неизвестная постоянная, которая носит название множителя Лагранжа. На знак  $\lambda$  никаких требований не накладывается.

Пусть при заданном значении  $\lambda = \bar{\lambda}$  безусловный минимум функции  $L(x, \bar{\lambda})$  по  $x$  достигается в точке  $x = \bar{x}$  и  $\bar{x}$  удовлетворяет уравнению  $h_1(\bar{x}) = 0$ . Тогда нетрудно видеть, что  $\bar{x}$  минимизирует (14.27) с учетом (14.28), поскольку для всех значений  $x$ , удовлетворяющих (14.28),  $h_1(x) = 0$  и  $\min L(x, \lambda) = \min g(x)$ .

Разумеется, необходимо подобрать значение  $\lambda = \bar{\lambda}$  таким образом, чтобы координата точки безусловного минимума  $\bar{x}$  удовлетворяла равенству (14.28). Это можно сделать, если, рассматривая  $\lambda$  как переменную, найти безусловный минимум функции (14.28) в виде функции  $\lambda$ , а затем выбрать значение  $\lambda$ , при котором выполняется равенство (14.28).

Пример.

$$\min g(x) = x_1^2 + x_2^2;$$

$$h_1(x) = 2x_1 + x_2 - 2 = 0.$$

Эта задача записывается в следующем виде:

$$L(x, \lambda) = x_1^2 + x_2^2 - \lambda(2x_1 + x_2 - 2);$$

$$\frac{\partial L(x, \lambda)}{\partial x_1} = 2x_1 - 2\lambda = 0 \rightarrow \hat{x}_1 = \lambda;$$

$$\frac{\partial L(x, \lambda)}{\partial x_2} = 2x_2 - \lambda = 0 \rightarrow \hat{x}_2 = \frac{\lambda}{2}.$$

Вычислим элементы матрицы Гессе функции  $L(x, \lambda)$ :

$$\nabla^2 L(x, \lambda) = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$$

Она оказывается определенной, следовательно мы имеем дело с минимумом.

Оптимальное значение  $\lambda$  находится путем подстановки значений  $\hat{x}_1$  и  $\hat{x}_2$  в уравнение  $2x_1 + x_2 = 2$ , откуда  $2\lambda + \lambda/2 = 2 \rightarrow \hat{\lambda} = 4/5$ . Таким образом, условный минимум достигается при  $\hat{x}_1 = 4/5$ ,  $\hat{x}_2 = 2/5$  и равен  $g(x) = 4/5$ .

При решении задачи предполагается, что значение  $\hat{\lambda}$  может быть выбрано из условия удовлетворения ограничения. Если же решение системы в частных производных  $L$  в виде явных функций  $\hat{\lambda}$  получить нельзя, то значения  $\hat{x}$  и  $\hat{\lambda}$  находятся путем решения следующей системы, состоящей из  $n + 1$  уравнений с  $n + 1$  неизвестными:

$$\frac{\partial L}{\partial x_j} = 0, \quad j \in [1, n], \quad h_k(x) = 0.$$

Для нахождения всех возможных решений данной системы можно использовать численные методы поиска.

Метод множителей Лагранжа можно распространить на случай, когда задача имеет несколько ограничений в виде равенств.

Рассмотрим общую задачу, в которой требуется найти

$$\min g(x);$$

$$h_k(x) = 0, \quad k \in [1, K].$$

В этом случае функция Лагранжа принимает следующий вид

$$L(x, \lambda) = g(x) - \sum_{k=1}^K \lambda_k h_k.$$

Приравняв частные производные  $L$  по  $x$  к нулю, получаем следующую систему  $n$  уравнений, которую в общем случае следует расширить еще на  $k$  уравнений так, что получится система из  $n + k$  уравнений и  $n + k$  неизвестных.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial L(x, \lambda)}{\partial x_1} &= 0 \\ \dots \dots \dots \\ \frac{\partial L(x, \lambda)}{\partial x_n} &= 0 \\ h_1(x) &= 0 \\ \dots \dots \dots \\ h_k(x) &= 0 \end{aligned} \right\}$$

Для более ясного понимания сущности множителей Лагранжа существует следующее рассуждение.

Пусть ограничение имеет вид

$$h_1(x_1, x_2) = b_1,$$

тогда функция Лагранжа примет вид

$$L(x, \lambda) = g(x) - \lambda[h_1(x) - b_1].$$

Условие получения стационарной точки  $L(x, \lambda)$

$$\frac{\partial L}{\partial x_j} = \frac{\partial g}{\partial x_j} - \lambda \frac{\partial h_1}{\partial x_j} = 0 \quad (14.29)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial x_2} = \frac{\partial Z}{\partial x_2} - \lambda \frac{\partial h_1}{\partial x_2} = 0 \quad (14.30)$$

Очевидно, что решение задачи  $Z, \hat{x}$  функционально связано с величиной  $b_1$ . Изменение  $g(\hat{x}, \hat{\lambda})$ , обусловленное изменением  $b_1$ , описывается частной производной  $\frac{\partial g(\hat{x}, \hat{\lambda})}{\partial b_1}$ . По правилу дифференцирования сложной функции

$$\frac{\partial g(\hat{x}, \hat{\lambda})}{\partial b_1} = \frac{\partial g(\hat{x}, \hat{\lambda})}{\partial x_1} \frac{\partial x_1}{\partial b_1} + \frac{\partial g(\hat{x}, \hat{\lambda})}{\partial x_2} \frac{\partial x_2}{\partial b_1} \quad (14.31)$$

Дифференцируя обе части ограничения  $h_1(x) - b_1 = 0$ , получим

$$\frac{\partial h_1}{\partial x_1} \frac{\partial x_1}{\partial b_1} + \frac{\partial h_1}{\partial x_2} \frac{\partial x_2}{\partial b_1} - 1 = 0 \quad (14.32)$$

Умножив части равенства (14.32) на  $\hat{\lambda}$  и вычтем из (14.31)

$$\frac{\partial g(\hat{x}, \hat{\lambda})}{\partial b_1} = \hat{\lambda} + \sum_{j=1}^n \left[ \frac{\partial g(\hat{x}, \hat{\lambda})}{\partial x_j} - \hat{\lambda} \frac{\partial h_1}{\partial x_j} \right] \frac{\partial x_j}{\partial b_1} \quad (14.33)$$

Поскольку  $\hat{x}, \hat{\lambda}$  удовлетворяют (14.29) и (14.30), (14.33) перепишется

$$\frac{\partial g(\hat{x}, \hat{\lambda})}{\partial b_1} = \hat{\lambda} \quad (14.34)$$

Условия Куна—Таккера, задача Куна—Таккера

Множители Лагранжа можно использовать при построении критериев оптимальности для задач с ограничениями как в виде равенств, так и в виде неравенств. Это сделано было Куном и Таккером.

$$\min g(x); \quad (14.35)$$

$$h_j(x) \geq 0, \quad j \in [1, J]; \quad (14.36)$$

$$h_k(x) = 0, \quad k \in [1, K]. \quad (14.37)$$

Кун и Таккер построили необходимые условия оптимальности для задач нелинейного программирования, исходя из предположения о дифференцируемости функций  $g, h_j, h_k$ . Эти условия оптимальности, широко известные как условия Куна—Таккера, можно сформулировать в виде задачи нахождения решения некоторой системы нелинейных уравнений и неравенств, или, как иногда говорят, задачи Куна—Таккера.

Найти векторы  $\hat{x}, \hat{\lambda}_j, \hat{\lambda}_k$ , удовлетворяющие следующим условиям:

$$\nabla g(x) - \sum_j \lambda_j \nabla h_j(x) - \sum_k \lambda_k \nabla h_k(x) = 0; \quad (14.38)$$

$$h_j(x) \geq 0, \quad j \in [1, J]; \quad (14.39)$$

$$h_k(x) = 0, \quad k \in [1, K]. \quad (14.40)$$

Для того, чтобы интерпретировать условия Куна—Таккера, рассмотрим задачу нелинейного программирования с ограничениями в виде равенств:

$$\min g(x);$$

$$h_k(x) = 0, \quad k \in [1, K].$$

Запишем условия Куна—Таккера

$$\nabla g(x) - \sum_j \lambda_j \nabla h_j(x) = 0; \quad (14.41)$$

$$h_k(x) = 0. \quad (14.42)$$

Эта задача отвечает функции Лагранжа для задачи нелинейного программирования с ограничениями типа равенств. Нетрудно видеть, что условия оптимальности Куна—Таккера в этом случае совпадают с задачей Лагранжа.

Рассмотрим задачу нелинейного программирования с ограничениями в виде неравенств

$$\min g(x);$$

$$h_j(x) \geq 0, \quad j \in [1, J].$$

Запишем условия Куна—Таккера

$$\nabla g(x) - \sum_j \lambda_j \nabla h_j(x) = 0;$$

$$h_j(x) \geq 0.$$

Соответствующая функция Лагранжа имеет вид

$$L(x, \lambda_j) = g(x) - \sum_j \lambda_j h_j(x) \quad (14.43)$$

Условия оптимальности этой функции записываются как

$$\nabla g(x) - \sum_j \lambda_j \nabla h_j(x) = 0 \quad (14.44)$$

$$h_j(x) = 0, \quad j \in [1, J].$$

Заметим, что  $\lambda_j$  — множитель Лагранжа ограничения  $j$ . Ранее было показано, что  $\lambda_j$  представляет значение минимального значения целевой функции  $g(x)$ , вызываемого единичным приращением правой части  $j$ -го ограничения.

Если предположить, что  $h_j(\hat{x}) > 0$ , то это "недействующее" ограничение и, следовательно, относительно него  $\lambda_j = 0 \rightarrow \lambda_j h_j(x) = 0$ . Если же  $h_j(x) = 0$  — "действующее" ограничение, то в точке решения задачи

$$h_j(\hat{x}) = 0 \rightarrow \lambda_j h_j(x) = 0.$$

При этом можно показать, что  $\lambda_j \geq 0$ .

### Теорема Куна—Таккера

С помощью множителей Лагранжа мы получили интуитивное представление о том, что условия Куна—Таккера тесно связаны с необходимыми условиями оптимальности.

Сейчас мы рассмотрим строгие формулировки необходимых и достаточных условий оптимальности решения задачи нелинейного программирования.

**Теорема 1.** Необходимость условий Куна—Таккера.

Рассмотрим задачу нелинейного программирования (14.38), (14.39), (14.40). Пусть  $g$  и  $h$  — дифференцируемые функции, а

$\nabla h_j$  и  $\nabla h_0$  линейно независимы. Если  $\hat{x}$  — оптимальное решение задачи, то существует такая пара векторов  $(\hat{\lambda}_j, \hat{\lambda}_0)$ , что  $(\hat{x}, \hat{\lambda}_j, \hat{\lambda}_0)$  является решением задачи Куна—Таккера.

**Теорема 2.** Достаточность условий Куна—Таккера.

Рассмотрим задачу нелинейного программирования (14.38), (14.39), (14.40). Пусть целевая функция  $g(x)$  выпуклая, все ограничения в виде неравенств содержат выпуклые функции  $h_j$ , а ограничения в виде равенств содержат линейные функции  $h_k$ . Тогда если существует решение  $(\hat{x}, \hat{\lambda}_j, \hat{\lambda}_0)$ , удовлетворяющее условиям Куна—Таккера, то  $\hat{x}$  — оптимальное решение задачи.

### Замечания

1. Для встречающихся на практике задач условия линейной независимости, как правило, выполняются. Если в задаче все функции дифференцируемы, то точку Куна—Таккера следует рассматривать как возможную точку оптимума. Таким образом, любые из методов нелинейного программирования сойдется к точке Куна—Таккера.

2. Если условия теоремы 2 выполнены, точка Куна—Таккера в то же время оказывается точкой глобального минимума. Следует отметить, что наличие хотя бы одного нелинейного ограничения в виде равенств приводит к нарушению предположений теоремы 2.

3. Достаточные условия, установленные теоремой 2, можно обобщить на случай задач с невыпуклыми функциями, входящими в ограничения в виде неравенств, невыпуклыми целевыми функциями и нелинейными ограничениями-равенствами. При этом используются также обобщения выпуклых функций, как псевдовыпуклые функции.

### Условия существования седловой точки

**Определение.** Говорят, что функция  $g(x, y)$  имеет седловую точку  $(x^*, y^*)$  если  $g(x^*, y) \leq g(x^*, y^*) \leq g(x, y^*)$ ,  $\forall x, y$ .

В определении седловой точки предполагается, что  $x^*$  минимизирует функцию  $g(x, y^*)$ , а  $y^*$  максимизирует функцию  $g(x^*, y)$ .

Обратимся к методу множителей Лагранжа, изложенному ранее:

$$L(x, \lambda) = g(x) - \sum_j \lambda_j h_j(x).$$

Предположим, что при  $\lambda = \hat{\lambda}$  минимум  $L(x, \hat{\lambda})$  достигается в точке  $x = \hat{x}$ , причём  $h_j(\hat{x}) = 0$ . В соответствии с методом множителей Лагранжа известно, что  $\hat{x}$  есть оптимальное решение задачи нелинейного программирования. Можно показать, что  $(\hat{x}, \hat{\lambda})$  — седловая точка функции Лагранжа, т. е.

$$L(\hat{x}, \lambda) \leq L(\hat{x}, \hat{\lambda}) \leq L(x, \hat{\lambda}), \forall x, \lambda.$$

Рассмотрим общую задачу нелинейного программирования:

$$\min g(x);$$

$$h_j(x) \geq 0, \quad j \in [1, J].$$

Задача Куна—Таккера о седловой точке формулируется следующим образом: найти  $(\hat{x}, \hat{\lambda})$ , чтобы неравенство

$$L(\hat{x}, \hat{\lambda}) \leq L(\hat{x}, \hat{\lambda}) \leq L(x, \hat{\lambda})$$

имело место для всех  $\lambda \geq 0$  и всех  $x \in \{X\}$ . При этом

$$L(x, \lambda) = g(x) - \sum_j \lambda_j h_j(x).$$

**Теорема 3.** Достаточные условия оптимальности.

Если  $(\hat{x}, \hat{\lambda})$  — решение задачи Куна—Таккера о седловой точке, то  $\hat{x}$  есть оптимальное решение задачи.

Теорема устанавливает лишь достаточные условия (не накладывая ограничений на выпуклость функций  $g, h_j$ ). Встречаются также задачи нелинейного программирования, в которых седловых точек нет, а оптимальное решение существует.

**Теорема 4.** Необходимые условия оптимальности.

Пусть  $\hat{x}$  минимизирует  $g(x)$  в условиях задачи нелинейного программирования. Если  $\{X\}$  — выпуклое множество,  $g(x)$  — выпуклая функция,  $h_j(x)$  — вогнутые функции, то существует такое  $\hat{\lambda} \geq 0$  что  $(\hat{x}, \hat{\lambda})$  — седловая точка функции Лагранжа.

*Методы линейного программирования*

Среди численных методов решения задачи оптимизации ГТХ корабли наиболее разработанными являются методы линейного программирования.

Задача линейного программирования формулируется следующим образом: в стандартных условиях задачи оптимизации найти некоторый вектор  $\hat{x}$ , удовлетворяющий выражению

$$g(\hat{x}) \leq g(0);$$

$$g(x) = \sum_{i=1}^m c_i x_i; \quad (14.45)$$

$$\sum_{i=1}^n a_{ij} x_i - b_j \geq 0, \quad j = [1, m], \quad x_i \in \{X\},$$

где  $a, b, c$  — константы,  $g(x)$  — целевая функция,  $x \in \{X\}$  — множество варьируемых параметров корабля.

Для решения задач линейного программирования используются различные численные методы. Наиболее известными из них является метод последовательного улучшения плана, т. е. решения (симплекс-метод). В основу этого метода положены свойства допустимых и оптимальных планов.

Любой метод решения задачи (14.45) связан с определением области допустимых решений. В общем случае область допустимых решений (планов) задачи линейного программирования является выпуклой  $m$ -мерной многогранной.

Для нахождения среди всех допустимых решений оптимального решения используют выражение для целевой функции  $g(x)$ , представляющее собой уравнение гиперплоскости размерности  $n$ . Решением задачи будет та из вершин  $m$ -мерного многогранника, в которой целевая функция приобретает наименьшее (наибольшее) значение. Геометрически такое решение может быть получено при движении гиперплоскости целевой функции по направлению нормали в сторону ее уменьшения (увеличения). Последний общей точкой гиперплоскости и многогранника об-

ласти допустимых решений, реализуемой при движении гиперплоскости, будет одна из вершин многогранника (в частном случае, одна из его граней или ребер — множество решений) — решение задачи (14.45).

Большинство практических задач линейного программирования содержит несколько десятков ограничений. Для реализации вычислительных процедур в этом случае, естественно, необходимо использовать ЭВМ. В качестве примера применения методов линейного программирования в последовательном проектировании рассмотрим следующую задачу.

**Пример 1.** Пусть для обеспечения топливом боевых кораблей в море предполагается приобретение нефтеналивных судов. Предположим также, что в составе танкерного флота действует два типа судов, имеющих ТТХ, приведенные в табл. 14.1.

Таблица 14.1

Тактико-технические характеристики	Тип I	Тип II
Водонетоннаж, т	8000	30 000
Количество перевозимого топлива, т	4500	20 000
Скорость поездаго хода, уз	16	22
Среднее время доставки одного корабля топливом в количестве 500 т, ч	5	1,5
Численность личного состава судна, чел	28	43
Стоимость судна, млн р	11 000	40 000
Коэффициент оперативного напряжения КОН	0,4	0,35

При этом, удаленность зоны использования боевых кораблей составляет около 5000 миль, а их общая потребность в топливе 3000 т в сутки.

Требуется определить оптимальное сочетание судов первого и второго типов, в случае приобретения которых задача обеспечения топливом боевых кораблей в море решалась бы с наименьшими затратами. При этом, из условий одновременного обеспечения боевых кораблей, находящихся на значительном

удалении друг от друга, общее количество судов не должно быть меньше 8. Общая численность личного состава этих судов не должна превышать 500 чел.

В качестве критерия такой задачи будет выступать общая стоимость приобретаемых судов обоих типов:

$$g(x) = 11\,000x_1 + 40\,000x_2,$$

где  $x_1$  и  $x_2$  — число судов первого и второго типов соответственно.

Ограничениями в задаче будут:

1. По общему числу судов

$$x_1 + x_2 \geq 8.$$

2. По численности личного состава

$$28x_1 + 43x_2 \leq 500.$$

3. По потребности в топливе боевых кораблей:

— среднее число танкеров, находящихся в море

для типа I:  $\text{КОН}_1x_1 = 0,4x_1$ ;

для типа II:  $\text{КОН}_2x_2 = 0,35x_2$ ;

— время перехода в район действия боевых кораблей и обратно

для типа I:  $t_{10} = 10000/16 = 625$  ч;

для типа II:  $t_{20} = 10000/22 = 454,5$  ч;

— время заправки кораблей (без учета перехода между ними)

для типа I:  $t_{11} = 4500 - 5/500 = 45$  ч;

для типа II:  $t_{21} = 20000 - 1,5/500 = 60$  ч.

В этом случае ограничение по потребности в топливе боевых кораблей должно удовлетворять неравенству

$$0,4x_1 - 45000/70 + 0,35x_2 - 20000/514,5 \geq 125$$

или

$$2,69x_1 + 21,38x_2 \geq 125.$$



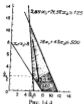


Рис. 14.4

Область допустимых решений обусловленная рассмотренными ограничениями, изображена на рис. 14.4. Вычислив значение критерия  $g(x)$  в каждой точке, отмеченной пересечением сторон многоугольника ОДР, находим такое  $\bar{x}$ , для которого выполняется условие

$$g(\bar{x}) \leq g(x).$$

В нашем примере  $\bar{x} = [2,5; 5,5]^T$ .

Таким образом, оптимальное количество нефтеналивных судов лежит в пределах: типа I — 2–3, типа II — 5–6.

Из предыдущего материала видно, что математическая модель корабля, с использованием параметров и переменных которой формируется целевая функция, носит, как правило, ярко выраженный нелинейный характер. Нелинейными чаще всего оказываются и функциональные ограничения, накладываемые на задачу. В связи с этими обстоятельствами методы линейного программирования занимают незначительное место в задаче оптимизации ТТХ корабля.

#### Методы направленного поиска

Методы нелинейного программирования сегодня применяются в большинстве задач оптимизации элементов корабля на стадии исследовательского проектирования.

В самом широком смысле общая задача нелинейного программирования полностью описывается выражениями (14.8) — (14.10). Однако общепринятой является несколько более узкая постановка общей задачи нелинейного программирования, в которой исключаются из рассмотрения следующие специальные задачи.

1. Переменные принимают лишь целочисленные значения (нелинейное целочисленное программирование). В этом случае либо задача сводится к общей задаче нелинейного программи-

рования, либо оптимизация на области решений заменяется сравнительной оценкой вариантов.

2. Ограничения включают как параметр время, т.е. динамическая задача оптимизации.

Как уже отмечалось, особое место в задачах нелинейного программирования занимает задача выпуклого программирования. В этом случае обычно говорят об унимодальности целевой функции и вогнутости (выпуклости) ограничений. Требования унимодальности функции является значительно более слабым, чем требование выпуклости (вогнутости), поскольку унимодальность не требует ни непрерывности, ни единственности производной. Кроме того, матрица вторых частных производных по  $x$  (матрица Гессе) может не быть положительно (отрицательно) определенной (или даже полуопределенной) всюду в  $E$ . (Множество точек, или область, называется выпуклым в  $E$ , если для всех пар точек  $x_1$  и  $x_2$ , принадлежащих этому множеству, отрезок прямой линии, соединяющий их, также принадлежит множеству.)

Из всех типов задач нелинейного программирования задача выпуклого программирования является единственной задачей, обеспечивающей условно корректности, так как решение задачи в этом случае существует и является единственным.

Для решения задач нелинейного программирования разработано большое количество численных методов. Выбор того или иного метода определяется конкретным содержанием задачи и опытом исследователя.

Все существующие методы решения задачи нелинейного программирования можно классифицировать [369] (см. рис. 14.3): по некоторым аспектам постановки задачи; по характерным чертам методов решения; по типу вычислительных машин, применяемых при реализации алгоритма; по используемому языку программирования.

Оставая в стороне методы одномерного поиска, как недостаточно сложные сложности реальной задачи оптимизации элементов корабля, характеризующейся значительной многомерностью, рассмотрим методы решения задачи нелинейного програм-

мирования в соответствии с первой, основной, их классификацией.

#### Методы нелинейного программирования без ограничений

Общая задача этого типа сводится к следующему:

Найти

$$\begin{aligned} f(\bar{x}) &\leq g(x), \\ \bar{x}, \quad \forall x \in \{X\}. \end{aligned} \quad (14.46)$$

Различают методы решения задачи (14.46), использующие производные целевой функции и не использующие производные (методы прямого поиска).

Среди наиболее разработанных и часто используемых методов, использующих производные, можно выделить градиентные методы решения задачи (наискорейшего спуска). В вычислительном аспекте эти методы используют только первые производные целевой функции. Применение градиентных методов для решения задачи оптимизации было рассмотрено еще известным французским математиком Коши. Как известно, градиент целевой функции  $g(x)$  в любой точке  $x$  есть вектор в направлении наибольшего локального увеличения  $g(x)$ . Следовательно, нужно двигаться в направлении, противоположном градиенту  $g(x)$ , т. е. в направлении наискорейшего спуска.

Имея ввиду многоступенчатый процесс решения, на  $k$ -ом этапе решения из точки  $x^{(k)}$  в точку  $x^{(k+1)}$  описывается соотношением:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - \lambda^{(k)} \nabla g(x^{(k)}), \quad (14.47)$$

где  $\lambda^{(k)}$  — скаляр, определяющий размер шага;  $\nabla g(x^{(k)})$  — значение градиента целевой функции в точке  $x^{(k)}$ .

Процедура наискорейшего спуска может закончиться в стационарной точке (в которой составляющие градиента  $g(x)$  равны нулю) различного типа. Обычно бывает необходимо определить, является ли данная точка точкой локального минимума (т. е. локальным решением) или седловой точкой. Если это седловая точка, то следует применить какой-либо неградиентный метод, чтобы выйти из нее, после чего минимизация может продолжаться как и ранее. Тип стационарной точки может быть прове-

рен путем исследования матрицы Гессе целевой функции, взятой в данной стационарной точке. Если эта матрица не является положительно определенной, то стационарная точка — седловая.

В качестве критерия окончания процедуры при движении в направлении наискорейшего спуска применяются различные правила, основанные либо на значениях  $g(x)$  и величинах  $x$ ,  $\lambda$ ,  $\dot{g}(x)$ , либо на некоторой их комбинации. Успех того или иного метода зависит от выбранного критерия и самой задачи.

При выборе величины  $\lambda$ , определяющей шаг спуска, существуют два подхода — спуск с постоянным шагом и спуск с шагом, уменьшающимся по мере приближения к экстремальной точке.

Применение градиентных методов связано с двумя существенными трудностями:

— в задачах с большим числом переменных, характерных для исследовательского проектирования, вычисление производных в точке является трудоемкой операцией, даже с помощью численных методов (например, разностных схем);

— для решения задачи необходимо значительное время на ее подготовку к решению.

#### Методы прямого поиска

От этих недостатков в некоторой степени свободны методы прямого поиска.

В типичном методе прямого поиска направления минимизации полностью определяются на основании последовательных вычислений целевой функции  $g(x)$ . По существу методы прямого поиска простейшего типа заключаются в изменении каждой раз одной переменной, тогда как другие остаются постоянными, пока не будет достигнут минимум.

Такой алгоритм не очень удачен, особенно если имеет место взаимодействие между независимыми переменными. В настоящее время разработан ряд методов прямого поиска, в большей или меньшей степени лишенных этого недостатка.

В целом, методы прямого поиска хотя и медленнее реализуются в случае простых задач, на практике могут оказаться более эффективными, чем градиентные методы.

Одним следует остановиться на таких методах поиска, как методы случайного поиска. Основным достоинством этих методов является возможность при задании определенного алгоритма вычисления с большой достоверностью получить точку глобального оптимума. В случае многоэкстремальной целевой функции как градиентные методы, так и методы прямого (регулярного) поиска позволяют получать только локальные оптимальные точки задачи. Существо методов случайного поиска заключается в случайном задании как шага поиска, так и направления. С увеличением числа таких шагов и удачным выборе стратегии генерирования случайных значений шага и направления поиска, вероятность нахождения глобального оптимума возрастает и может быть доведена до удовлетворительного значения.

#### *Методы нелинейного программирования при наличии ограничений, другие методы*

В этой области нелинейного программирования методы решения менее разработаны по сравнению с областью нелинейного программирования, охватывающего круг задач, в которых ограничения отсутствуют.

При решении задач нелинейного программирования с ограничениями встречаются гораздо большие трудности, чем при решении сопоставимых задач безусловной (без ограничений) оптимизации по той причине, что искомое решение должно подчиняться дополнительному требованию, а именно — удовлетворять ограничивающим условиям.

Существующие вычислительные процедуры решения задач нелинейного программирования, содержащей ограничения, в большинстве своем опираются на один из следующих подходов.

1. Распространение аппарата линейного программирования на условия нелинейного программирования путем использования процедуры последовательной (повторяемой определенное число раз) линейной аппроксимации.

2. Преобразование задачи нелинейного программирования с ограничениями в эквивалентную ей последовательность задач

безусловной оптимизации путем введения в рассмотрение штрафных функций.

3. Использование сдвигающих допусков, позволяющих оперировать в процессе решения задачи оптимизации как с допустимыми, так и с недопустимыми (но близкими к допустимым) векторами в пространстве решений.

Целесообразность выбора того или иного из рассмотренных выше путей определяется эффективностью этого алгоритма при решении конкретного класса задач истинного программирования с помощью ЭВМ.

Конкретные методы условной оптимизации в связи с их сложностью и громоздкостью здесь не рассматриваются. Вместе с тем, следует иметь в виду, что подавляющее большинство практических задач оптимизации элементов корабля решается именно численными методами условной оптимизации. Полное изложение с подробным содержанием методов решения задач нелинейного программирования можно найти в [92, 366].

#### *Метод динамического программирования*

Динамическое программирование представляет собой математический метод, специально приспособленный к многоступенчатому процессам. Пусть исследуемый процесс представляется собой процесс, развивающийся во времени и распадающийся на ряд "шагов" или "этапов". На каждом шаге принимается какое-то решение, от которого зависит успех данного шага и всего процесса в целом. Таким образом, управление процессом складывается из ряда элементарных "шаговых" управлений.

Суть метода динамического программирования заключается в постепенной, пошаговой оптимизации процесса.

Процедура решения задачи этим методом заключается в том, что на последнем,  $n$ -ом, шаге оптимизации находится некоторое "условное оптимальное управление", исходя из предположения о результате, полученном после предыдущего шага. Затем решение об условных оптимальных управлениях принимается на  $n-1$ -ом шаге оптимизации и т. д. до 1-го шага. Этот принцип выбора управления получит название "принципа оптимальности".

После построения условных оптимальных управлений процесс выработки оптимального решения возобновляется, но уже по направлению к  $n$ -му элементу. При этом, на каждом шаге оптимизации, исходя из конкретных начальных условий задачи, определяется не условное, а фактически оптимальное управление. Решение задачи заканчивается выработкой оптимальной стратегии управления.

Метод динамического программирования является достаточно эффективным, но применим к очень узкому кругу задач, в связи с чем в задачах восстановительного проектирования применяется редко.

### Метод ЛП-поиска

При решении сложных задач оптимизации, когда целевые функции и допустимые области оптимизируемых параметров не обладают такими свойствами, как унимодальность, выпуклость, связность и т. п., возникает необходимость исследовать пространство оптимизируемых параметров в некотором конечном числе дискретных точек. Эти точки могут быть выбраны случайно или неслучайно. В частности, наиболее широко применяется равномерное покрытие области значений непрерывно варьируемых ТТХ.

Метод ЛП-поиска основан на покрытии допустимой области оптимизируемых параметров случайной сеткой точек. Последняя строится с помощью, так называемой, ЛП-последовательности точек, равномерно распределенных в  $i$ -мерном кубе, где  $i$  — число непрерывно варьируемых параметров. Эта последовательность построена И. М. Соболем, а существо метода и приложения к восстановительному проектированию изложено в работе [84].

Идея метода ЛП-поиска состоит в обследовании допустимой области значений оптимизируемых параметров в дискретных точках, соответствующих равномерно распределенным в единичном кубе точкам Соболя. При числе точек, стремящемся к бесконечности, последовательность Соболя обладает наступившей равномерностью расположения и, таким образом, обеспечивает получение решения с наименьшим числом шагов поиска. Оче-

видно, что даже при выборе точек из ЛП-последовательности, число их оказывается достаточно большим. Поэтому применение метода ЛП-поиска при оптимизации элементов корабля достаточно ограничено.

В качестве альтернативы существу методов поиска рассмотрим два примера прямого поиска.

**Пример 1.** Пусть задача оптимизации состоит в минимизации целевой функции без ограничений. Рассмотрим корабль, предназначенный для нанесения ракетного удара по противнику. Тогда показатель эффективности такого корабля можно представить как вероятность решения поставленной задачи. Будем считать, что событие, заключающееся в решении задачи, представляет собой марковскую последовательность таких случайных событий, как обнаружение цели и ее уничтожение. В этом случае показатель эффективности можно записать в виде:

$$E = P_{\text{выр}} P_{\text{об}}.$$

где  $P_{\text{выр}}$  — вероятность поражения цели;  $P_{\text{об}}$  — вероятность обнаружения цели.

Вероятность поражения цели при нескольких выстрелах имеет вид:

$$P_{\text{выр}} = 1 - \exp\left(-\frac{P}{\omega} N_{\text{кр}}\right),$$

где  $P$  — вероятность поражения цели при выстреле одной ракетой;  $\omega$  — среднее число попаданий в цель, необходимое для ее поражения;  $N_{\text{кр}}$  — число крылатых ракет, размещаемых на корабле.

Рассуждая аналогично, можно предположить выражение для определения вероятности обнаружения цели:

$$P_{\text{об}} = 1 - \exp(-\alpha \cdot m_{\text{рад}}).$$

где  $\alpha$  — удельная эффективность средства обнаружения, приходящаяся на 1 т их массы;  $m_{\text{рад}}$  — масса радиолокационных средств обнаружения цели, т.

При этом, под ресурсным показателем понимается стоимость создания корабля.

$$S = S_0 + \lambda_{\text{ар}} N_{\text{ар}} + \lambda_{\text{рае}} M_{\text{рае}}, \text{ млрд р.}$$

где  $\lambda_{\text{ар}}$  и  $\lambda_{\text{рае}}$  — удельные затраты на создание тонны ракетного и радиоэлектронного вооружения соответственно;  $S_0$  — свободный член, учитывающий стоимость корабля, не зависящую от ракетного и радиоэлектронного вооружения.

Рассматриваемая модель функционирования не учитывает целый ряд существенных факторов, однако она достаточно содержательна для примера, иллюстрирующего возможности применения метода поиска. В данном случае используется метод Хука и Дживса [169].

В соответствии с принципами военно-экономического анализа в качестве целевой функции задачи рассматривается отношение вида:

$$g = SE^{-1}.$$

Тогда задача поиска оптимального сочетания числа крылатых ракет, размещаемых на корабле, и массы радиоэлектронного оборудования, обеспечивающего обнаружение цели, может быть записана следующим образом:

Найти также  $\hat{N}_{\text{ар}}$  и  $\hat{M}_{\text{рае}}$ , что

$$g(\hat{N}_{\text{ар}}, \hat{M}_{\text{рае}}) \leq g(N_{\text{ар}}, m_{\text{рае}}),$$

где функция  $g(N_{\text{ар}}, m_{\text{рае}})$  отвечает выражению для целевой функции. Для удобства, входящих в выражение для целевой функции, примем следующие значения:

$$P = 0,63; \omega = 4; \alpha = 0,02 \frac{1}{\text{р}}; S_0 = 80 \text{ млрд руб.};$$

$$\lambda_{\text{ар}} = 2 \text{ млрд руб.}; \lambda_{\text{рае}} = 0,5 \text{ млрд руб./т}$$

В соответствии с вышеизложенной процедурой, предусмотренной методом Хука и Дживса, выбирается так называемая базисная точка поиска

$$x^{(0)} = [N_{\text{ар}}, m_{\text{рае}}]^T = [2; 5]^T$$

с начальным шагом  $\Delta x = [4; 10]^T$ . Исходное значение  $g(2; 5)$  в базисной точке  $x^{(0)}$  равно 3363,9.

Сначала проводится так называемый последующий поиск типа I для определения удачного направления. (Такая процедура называется исследующим поиском типа I в противоположность исследующему поиску типа II, который следует позже).

$$x_1^{(1)} = 2 + 4 = 6; \quad g(6; 5) = 1624,4 \text{ (успех);}$$

$$x_2^{(1)} = 5 + 10 = 15; \quad g(6; 15) = 628,0 \text{ (успех).}$$

Исследующий поиск оказался удачным. Заметим, что при каждом поиске выбирается последний удачный вектор  $x$ . Новым базисным вектором будет (6; 15).

Теперь из точки (6; 15) проводится так называемый поиск по образцу в соответствии со следующим правилом:

$$x_1^{(k+1)} = 2x_1^{(k)} - x_1^{(k-1)},$$

где  $x_1^{(k)}$  — предыдущий базисный вектор  $x$ . В данном случае это начальный вектор  $x^{(0)}$ .

$$x_1^{(2)} = 2 \cdot 6 - 2 = 10;$$

$$x_2^{(2)} = 2 \cdot 15 - 5 = 25;$$

$$g(10; 25) = 360,5.$$

Наконец проводится исследующий поиск типа II; неудачный успех его оценивается в сравнении с  $g(10; 25)$ :

$$x_1^{(3)} = 10 + 4 = 14, \quad g(14; 25) = 344,2 \text{ (успех);}$$

$$x_1^{(4)} = 10 - 4 = 6, \quad g(6; 25) = 434,4 \text{ (неудача);}$$

$$x_2^{(4)} = 25 + 10 = 35, \quad g(14; 35) = 280,2 \text{ (успех);}$$

$$x_2^{(5)} = 25 - 10 = 15, \quad g(14; 15) = 500,8 \text{ (неудача).}$$

Чтобы определить, оказался ли поиск по образцу успешным, сравнивают  $g(14; 35) = 280,2$  с  $g(10; 25) = 360,5$ . Поскольку поиск по образцу успешен, то новой базисной точкой будет  $x^{(1)} = [14; 35]^T$ , при этом старая базисная точка представлена вектором

$x^{(1)} = [6; 15]^T$ . Затем процедура поиска возобновляется, начиная снова с поиска по образцу. В результате реализации восьми шагов поиска в рассматриваемом примере достигается точка  $x^{(8)} = [18; 145]^T$ , относительно которой поиск по образцу к успеху не приводит. После этого следует возвратиться к последующему поиску типа I. Точка, относительно которой поиск в любом координатном направлении не приводит к успеху, является решением задачи. В рассматриваемом примере такой точкой будет

$$\hat{x} = [17; 100]^T, \quad g(17; 100) = 203,7.$$

В последние годы широкое распространение получили ПЭВМ. Учитывая значительные вычислительные возможности этих машин, начинает выходить литература с изложением программ выполнения расчетов, в том числе и программ, позволяющих решать задачи нелинейного программирования.

**Пример 2.** Для целевой функции, сформулированной в примере 1, с сохранением принятых в этом примере независимых переменных задача минимизации функции  $g$  может быть решена, так называемым, методом спирального координатного спуска. Этот метод часто используется в компьютерном проектировании, так как при относительно низкой трудоёмкости он позволяет построить поисковую вычислительную процедуру, не затрагивая алгоритма вычисления математической модели.

Применительно к нашему примеру суть метода спирального координатного спуска заключается в следующем.

Выбирается начальная точка поиска, заведомо достаточно далеко отстоящая от точки оптимума ( $x^{(0)} = [N_{x_1}^{(0)}; m_{x_2}^{(0)}]^T = [2; 3]^T$ ).

Назначаются начальные шаги поиска по каждой переменной  $N_{x_1}, m_{x_2}$  и делитель шага  $a$  (обычно  $a = 2$ ).

Затем определяется приращение по одной из переменных (например  $N_{x_1}$ )

$$N_{x_1}^{(1)} = N_{x_1}^{(0)} + N_{x_1}$$

и вычисляется значение целевой функции в новой точке

$$g(x^{(1)}) = g(N_{x_1}^{(1)}; m_{x_2}^{(0)})$$

Если  $g(x^{(1)}) < g(x^{(0)})$ , то движение по выбранной переменной продолжается.

В точке  $x^{(1)}$ , для которой  $g(x^{(1)}) \geq g(x^{(0)})$  движение по переменной  $N_{x_1}$  прекращается и задается приращение по второй переменной

$$m_{x_2}^{(1)} = m_{x_2}^{(0)} + m_{x_2}.$$

Движение в этом направлении также прекращается в случае получения положительного приращения целевой функции  $g$ .

После завершения движения по обоим направлениям изменяется шаг приращения переменных в соответствии с выражением

$$N_{x_1}^{(i+1)} = \frac{N_{x_1}^{(i)}}{a};$$

$$m_{x_2}^{(i+1)} = \frac{m_{x_2}^{(i)}}{a}.$$

Затем процедура повторяется. При этом, движение с новым шагом начинается из той точки, где был завершен первый шаг поиска.

В результате многократной реализации описанной процедуры траектория поиска приобретает вид спирали, начало которой совпадает с начальной точкой поиска, а центр — с точкой оптимума, т. е. решением задачи.

Поиск оптимальной точки может быть прекращен по какому-либо абсолютному значению величин  $|N_{x_1}|$  и  $|m_{x_2}|$ , относительно какому-либо начальному приращению. В нашем примере для обоих переменных был выбран единый начальный шаг поиска

$$N_{x_1} = m_{x_2} = k = 5,$$

а признаком завершения поисковой процедуры является условие

$$|k| \leq \epsilon, \quad \epsilon = 1.$$

Решением описанной задачи является точка

$$\hat{N}_{opt} = 16,4, \quad \hat{m}_{opt} = 100 \text{ т.}$$

При этом значение целевой функции в оптимальной точке составило

$$g(\hat{N}_{opt}, \hat{m}_{opt}) = 203,67.$$

## Глава 15. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫХ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОРАБЛЯ

### 15.1. ПОСТАНОВКА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ, ПАРЕТОВСКИЙ АНАЛИЗ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ

До сих пор нами рассматривались постановка и методы решения задачи оптимизации применительно к принятой проектной модели на стадии последовательного проектирования корабля. Решая такую задачу любым из известных из теории оптимизации методов, находится оптимальный относительно принятой целевой функции вариант корабля. Известно, что целевая функция — это некоторая формализация степени достижения системой поставленной перед ней цели. Следовательно, рассматриваемая ранее задача оптимизации неизбежно предполагает, что проектируемая система создается с какой-то одной конкретной целью. Однако на самом деле это не так. Корабль по своей сути является сложной многоцельной системой, предназначенной для решения не одной, а ряда задач. Собственно, представление корабля в методологических рамках системного подхода находит свое конструктивное воплощение только при многоцелевом аспекте его рассмотрения, так как представление корабля как системы предполагает прежде всего наличие подсистем и элементов, каждый из которых решает поставленные перед ним задачи, и, следовательно, преследует конкретные частные цели. Для аналогии можно заметить, что одолевшая модель корабля представляет собой простую систему типа

"вход—выход", т. е. вырожденную систему, состоящую из одного элемента.

В недалеком прошлом вопрос о многоцелевой постановке не стоял так остро, так как проблема решалась путем выделения основной задачи, а вопрос об остальном оборудовании и технических средствах, обеспечивающих решение других задач, выносился за рамки задачи оптимизации. Сегодня положение в корне изменилось. С увеличением разнообразия и эффективности технических средств, разрабатываемых для кораблей, потребность рассматривать корабль как многоцелевую систему возрастает, так как одной из основных при проектировании становится следующая проблема: в какой степени и какими средствами должен корабль решать все многообразие задач, чтобы по совокупной оценке считаться оптимальным. Если одолевшей моделью корабля соответствует математическая задача оптимизации, т. е. так называемая однокритериальная задача, то в случае рассмотрения многоцелевой модели возникает необходимость решения многоцелевой задачи оптимизации.

Методологии многокритериальной оптимизации в настоящее время отвечает целый ряд задач исследовательского проектирования, решение которых не обеспечивается существующими математическими методами, а применение эвристических (неформальных) подходов не даст удовлетворительных результатов. Постановка таких задач диктуется требованиями практики и в современных условиях не может не приниматься во внимание. Одной из причин появления задач проектирования, не укладывающихся в традиционную постановку, является необходимость вычисления взаимодействий однокритерий, отдельно взятых проектных решений друг на друга. Такая проблемная ситуация может складываться на различных уровнях принятия решения.

Так, при формировании программы вооружения кораблестроения возникает задача определения такой номенклатуры планируемых к строительству боевых кораблей и судов обеспечения, чтобы в результате реализации принятой программы действующий корабельный состав флота был бы сбалансирован по своим боевым возможностям. Центральным моментом при решении

этой проблемы становится формулирование самого понятия обобщенности.

На более высоком уровне, при разработке тактико-технического задания на отдельный корабль, возникает задача выбора рационального состава оружия и вооружения корабля при одновременной оптимизации его тактических характеристик в условиях действующих ограничений по производственным возможностям серийного строительства таких кораблей (или прогнозирования расширения производственных возможностей промышленности в рассматриваемый период). При этом, принципиальную сложность представляет понятие рационального состава средств при условии, что корабль предназначен для решения различных боевых задач и порядок выполнения этих задач какой-либо последовательностью заранее определен быть не может.

В результате создания новых, более эффективных образцов оружия и вооружения для кораблей, как правило, растут и их массо-габаритные характеристики. Это обстоятельство не позволяет рассматривать процесс создания корабля только как создание собственно носителя корабельного вооружения. Важным элементом корабля-носителя и его вооружения становится настолько значимым, что возникает проблема выработки основных тенденций развития корабельного вооружения по результатам ранних этапов проектирования корабля. Наиболее сложным здесь оказывается выявление единичного звена результатов исследовательского проектирования на ту или иную характеристику образца оружия или вооружения из всего набора образцов, устанавливаемых на корабле.

Наконец, существует проблема обеспечения некоторого рационального распределения между совокупностью наблюдаемых свойств корабля при отсутствии возможности их одновременно улучшить до удовлетворительного уровня. Дополнительные сложности в решении этой проблемы, помимо уже рассмотренных, возникают из-за отсутствия подходов к определению относительных полезностей свойств корабля, не имеющих строгой функциональной направленности по отношению к кораблю как боевой единице. Речь идет о свойствах обслуживающих (сервисных

свойствах), таких как защищенность, электромагнитная совместимость и т. п.

Сформулированные проблемы могли бы быть распространены на задачи проектирования таких системных объектов, как разведывательно-ударные комплексы, разнородные силы флота, боевые корабли — силы и средства тылового обеспечения и т. п. Однако с теоретической точки зрения содержательная часть возникающей проблемы при определении усложнении процесса моделирования не получила бы в этом случае дополнительного развития.

Отличительной особенностью всех рассмотренных проблем является то, что предпочтительность проектируемых объектов, отвечающих, например, такому понятию, как обобщенность сил флота, ясна на интуитивном уровне. Действительно, обобщенность сил флота можно обеспечить наиболее полную реализацию боевого потенциала флота как по боевым возможностям самих кораблей в решении всех свойственных флоту задач, так и по организации взаимодействия и управления силами флота в целом. Вместе с тем для конструктивного решения этой проблемы, т. е. для того, чтобы можно было выработать программу вооружения кораблестроения на планируемый период, разработать тактико-техническое задание на проектирование корабля и т. п. при позитивном разрешении поставленных проблемных вопросов, необходимо воспользоваться количественными методами анализа возможных альтернатив, формализованным понятием обобщенности, рациональности состава средств, относительной полезности свойств и т. п. Формализация указанных понятий представляет серьезную проблему, требующую теоретического решения.

При несомненной важности по отношению к задачам, решаемым методами однокритериальной оптимизации, рассматриваемая проблема обладает определенной спецификой, служащей основой постановку задачи выбора (см. п. 1.4). Суть ее заключается в том, что при формировании задач, возникающих в рамках данной проблемы, внимание исследователя сосредотачивается на поиске некоторого компромиссного решения, отвечающего распределению обобщенного ресурса между



интересами противоречивых аспектов моделирования. Например, при рассмотрении ударных и защитных свойств корабля компромиссное содержание задачи будет обеспечено, если предположить, что достигнуть достаточно высокого уровня этих свойств одновременно невозможно, а улучшение одного из них, обязательно ведет к ухудшению другого. Здесь следует заметить, что при введении термина "компромисс" под ним понимается не только и не столько некоторый вариант, т. е. взаимудобное, полновинное решение, сколько жесткое распределение обобщенного ресурса между частными целями проектирования — будь то обеспечение свойств проектируемого объекта или удовлетворение частным интересам тех или иных его элементов. В случае отсутствия компромиссного содержания задачи проблемную ситуацию, сформулированную выше, реализовать не удастся. Существующие методы теории оптимизации также рассматривают компромиссные ситуации, что и позволяет говорить о сужении общей постановки. Однако в этом случае возможна только упрощенная постановка, не обеспечивающая решения ни одной из сформулированных проблем.

Первые многокритериальная задача была поставлена в начале шестидесятых годов, и с тех пор этому классу задач немалое внимание. Несколько позже появились обзорные работы, представляющие классификацию многокритериальных задач оптимизации и методов их решения [38, 40, 38, 71, 85, 127, 238]. Не затрагивая терминологические особенности, присущие той или иной классификации, следует отметить, что все существующие методы решения многокритериальных задач существенно различаются по тому подходу, с помощью которого определяется количественная мера компромисса между частными целевыми функциями, отражающими интересы рассматриваемых аспектов математической модели корабля (ММК).

Проблема постановки многокритериальной задачи оптимизации заключается в определении процедуры выбора оптимального решения  $\bar{x}$  по совокупности частных критериев. Предположение о наличии единственного вектора  $\bar{x}$  говорит о том, что вариант корабля, отвечающий этому вектору, в некотором смысле предпочтительнее других вариантов. Последнее означа-

ет, что существует единственная цель проектирования, которая определенным образом связана с частными критериями оптимальности, но неизвестна исследователю (в том смысле, что не представляется возможным записать ее формально).

Пусть корабль представлен системой, обладающей  $l$  элементами. При этом будем пока считать, что все  $l$  элементов замыкаются на один элемент высшего уровня, т. е. на саму систему. Пусть также дано семейство выпуклых множеств  $\{X_i\}$ ,  $i = [1, n]$ , заданных в положительном полупространстве  $i$ -мерного симплекса пространства  $E^i$ ,  $\{X_i\} \in E^i$ ,  $i = [1, n]$ . Тогда на множествах  $\{X_i\}$  получаем множество оценок функционирования элементов

$$g_i(x_i), \forall x_i \in \{X_i\}, i = [1, n], \quad (15.1)$$

где  $\{x_i\}$  — множество решений однокритериальной задачи оптимизации, поставленной в  $i$ -м элементе структуры;  $\{g_i(x_i)\}$  — множество частных критериев корабля.

Для того, чтобы многокритериальная задача оптимизации отвечала задаче проектирования и для обеспечения дальнейших рассуждений, потребуем выполнения условия:

$$\{X_i\} = \{X\}, i = [1, n], \quad (15.2)$$

Выполнение условия (15.2) предполагает, что все частные критерии (15.1) изменяются на одном поле переменных.

При стратификации (см. п. 1.2) условие (15.2) выполняется достаточно просто. Действительно, при рассмотрении всего корабля под любым углом зрения или при решении им любой боевой задачи, что отвечает идее стратификации, кажется естественным оставить неизменным перечень интересующих проектанта переменных, определяемый вектором  $\bar{x}$ . Что касается эшелонирования, то условие замыкания, сформулированное в п. 1.2, уже требует выполнения (15.2) хотя бы для одной переменной. Назовем пересекающимися системами также, множества варьируемых переменных которых в значительной степени отвечают условию (15.2), и будем считать, что система удобна для эшелонирования, если все ее подсистемы легко представимы пересекающимися системами.

В качестве примера независимых переменных, удовлетворяющих условию (15.2) и, таким образом, обеспечивающих "пересечение" в системах, можно рассмотреть такие независимые переменные подсистем авианосца "платформа—носитель" и "авиационное вооружение" (предполагается разбиение корабля только на эти две подсистемы), как:

"платформа—носитель"	"авиационное вооружение"
длина корабля.....	длина полетной палубы
ширина корабля.....	ширина полетной палубы
масса раздела нагрузки "вооружение".....	масса подсистемы
скорость хода корабля.....	скорость набегающего воздушного потока над полетной палубой

и т.д.

Условие "пересечения" необходимо только для систем с элементами, расположенными на одном уровне и замыкающимися на один выходящий элемент. Поскольку именно такие системы сейчас рассматриваются, то каких-либо дополнительных комментариев здесь не требуется.

Таким образом, считая в дальнейшем, что условие (15.2) соблюдается, множество оценок функционирования элементов системы может быть записано:

$$g(x) \forall x \in (X), i = [1, n] \quad (15.3)$$

При этом так же, как при постановке однокритериальной задачи оптимизации, полагаем, что из множества  $(X)$  всегда может быть выделено выпуклое подмножество допустимых решений  $(X')$  так, что  $(X') \subseteq (X)$ .

Решая в элементах системы однокритериальные задачи оптимизации, задаваемые тройками  $(F, g, (X'))$ , получим решения оптимизационных задач в элементах:  $\hat{x}_i, i = [1, n]$ . Здесь решения  $\hat{x}_i$  представляют собой  $i$ -мерные векторы с компонентами — оптимальными относительно  $i$ -х целевых функций значениями так-

нико-технических характеристик (ТТХ) корабля. Для этих векторов значения частных целевых функций отвечают условием:

$$g(x_i) \leq g(x), \forall x, \hat{x}_i \in (X'), i = [1, n] \quad (15.4)$$

Из проективной интерпретации (15.4) видно, что решение многокритериальной задачи оптимизации  $\hat{x}$  должно занимать некоторое промежуточное положение между точками локальных оптимумов, удовлетворяющими условию (15.4). То, что точка локального оптимума тождественно совпадает, прямо следует из первого правила декомпозиции, подразумевающего разделение целей элементов, а следовательно, в общем случае и решений, удовлетворяющих этим целям. Необходимость существования промежуточного решения  $\hat{x}$  обуславливается также компромиссным содержанием проективной задачи. С точки зрения системного анализа этот аспект находит свое выражение в понятии замыкания, сформулированного ранее. Тот факт, что система замкнута хотя бы по одной переменной уже подразумевает конфликтную ситуацию по распределению решения относительно этой переменной и при синтезе системы приводит к компромиссному решению.

Для решения задачи о нахождении вектора  $\hat{x}$  необходимо из всего множества допустимых решений задачи  $(X')$  выделить решения, отвечающие идее компромисса. Эти решения образуют новую область, называемую областью Парето (по имени итальянского экономиста В. Парето).

**Определение.** В многокритериальной задаче оптимизации точка  $x^0 \in (X)$  принадлежит области Парето ( $x^0 \in (X^0)$ ), если не существует другой точки  $x$ , для которой

$$g(x) \leq g(x^0), i = [1, n] \quad (15.5)$$

и хотя бы для одного частного критерия выполняется строгое неравенство.

Множество таких точек называется множеством точек, оптимальных по Парето ( $x$ -оптимальных). Оно также называется множеством недоминируемых точек, т. е. нельзя найти другой та-

кой точки, чтобы улучшалась какой-либо из частных критериев, а остальные при этом не ухудшались.

Наиболее распространенная формализация представления области Парето ( $\pi$ -области) была получена С. Карпеном /160/ для строго выпуклых частных целевых функций в виде следующей теоремы.

**Теорема 15.1 /160/.** Пусть множество векторных оценок строго выпукло, ограничено и замкнуто. Для того, чтобы решение  $x^* \in \{X\}$  было  $\pi$ -оптимальным, необходимо и достаточно, чтобы существовали такие неотрицательные коэффициенты

$\alpha_i \geq 0, \dots, \alpha_n \geq 0, \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$ , для которых

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i g_i(x^*) \leq \sum_{i=1}^n \alpha_i g_i(x), \forall x \in \{X\}. \quad (15.6)$$

Доказательство теоремы 15.1 можно найти, в частности, в /160/. Ограниченность и замкнутость множества векторных оценок предполагаются для обеспечения существования  $\pi$ -оптимальных решений, а условие сумм  $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$  добавляется для того,

чтобы избежать тривиального случая  $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_n = 0$ . В дальнейшем мы не будем сохранять это ограничение, полагая, что тривиального случая в практических задачах всегда можно избежать менее жестким ограничением.

Теорема 15.1 дает ответ на вопрос, каким условием удовлетворяют  $\pi$ -оптимальные решения в выпуклых задачах? Этот результат следует из Теоремы отдельности выпуклых множеств /160/. В невыпуклом случае воспользоваться линейной функцией частных критериев (15.6) для получения оптимальных по Парето точек уже не удастся. Это понятно, поскольку в этом случае теорема отдельности неприменима. Для невыпуклых многокритериальных задач справедлив следующий результат, полученный Ю. Б. Гермейром.

**Теорема 15.2 /87/.** Пусть множество  $\pi$ -оптимальных векторных оценок ограничено, замкнуто и целиком лежит во внутренней неотрицательской орбите. Для того, чтобы решение  $x^*$

было  $\pi$ -оптимальным, необходимо и достаточно, чтобы существовали строго положительные коэффициенты  $\alpha_1, \dots, \alpha_n, \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$ , удовлетворяющие условию

$$\max_{x \in X^*} \alpha_i g_i(x^*) \leq \max_{x \in X} \alpha_i g_i(x), \forall i \in \{1, n\}, \quad (15.7)$$

причем равенство имеет место тогда и только тогда, когда

$$g_i(x) = g_i(x^*), \quad i = \{1, n\}.$$

При этом в /87/ отмечается, что если на частные критерии не накладывать никаких дополнительных ограничений, то может возникнуть ситуация, когда решения, получаемые по (15.7), будут и не оптимальны по Парето. Можно показать, что в том случае, если частные критерии представляют собой псевдовыпуклые (унимодальные) функции, все решения (15.7) и только они будут  $\pi$ -оптимальными.

Помимо приведенных путей выделения точек области Парето в работе /123/ рассмотрены и другие известные типы условий  $\pi$ -оптимальности: условия Да Каноа—Полака, а также условие, полученное в /123/ для случая выпуклых задач и являющееся наиболее общим по отношению ко всем рассмотренным ранее. Вместе с тем, выделение точек области Парето аналитически возможно только с использованием теоремы 15.1, а алгоритмически гарантированное выделение  $\pi$ -оптимальных точек реализуется только в случае псевдовыпуклых частных критериев в соответствии с теоремой 15.2. В связи с этим в дальнейшем будут рассматриваться только налагаемые на вид частных критериев условия, выполнение которых обеспечивает использование результатов теорем 15.1 и 15.2 (строгой выпуклости, псевдовыпуклости, непрерывности и непрерывнодифференцируемости). Традиционно, попытки геометрического построения области Парето осуществлялись в критериальном пространстве /123, 175, 220, 239/ и, как правило, только качественно. Вместе с тем, достаточно полную картину компромиссной ситуации можно получить только в параметрическом пространстве, т. е. в пространстве,

построенном с помощью самих варьируемых переменных. Примеры такого построения можно посмотреть в §§6, 137, 141. В этом случае область Парето представляет собой многомерную область, ограниченную точками локальных оптимумов (15.4) и многомерными линиями, соединяющими каждую пару этих точек и для строго выпуклых функций отвечающими условию:

$$g(x^*) + \alpha_j g(x^*) = \min\{g(x) + \alpha_j g(x)\}, \quad (15.8)$$

$$\alpha_j = [0, \infty], \quad j \in \{J\}, \quad j \in \{J\}.$$

В каждой точке многомерной линии (15.8) градиенты целевых функций  $g(x)$  и  $g(x)$  противоположно направлены, т. е. градиенты частных целевых функций внутри и на границе области Парето имеют попарно противоположные знаки. Это можно видеть из следующего рассуждения. Поскольку необходимым и достаточным условием экстремума выпуклой функции является равенство нулю первой производной, преобразуя (15.8) к виду:

$$\nabla g(x^*) + \nabla \alpha_j g(x^*) = 0,$$

$$\alpha_j = [0, \infty], \quad j \in \{J\}, \quad j \in \{J\},$$

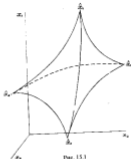
всегда можно получить:

$$\nabla g(x^*) = -\alpha_j \nabla g(x^*), \quad (15.9)$$

$$\alpha_j = [0, \infty], \quad j \in \{J\}, \quad j \in \{J\}.$$

Из (15.9) также следует, что линии (15.8) представляют собой геометрические места точек касания линий равного уровня (или равного градиента) каждой пары целевых функций. В целом, область Парето представима в виде  $n$ -вершинного  $l$ -мерного несвязывающего симплекса с вершинами (15.4) и ребрами (15.8). (Под несвязывающим симплексом здесь понимается значительная кривизна его граней.) Для того, чтобы внутренность области Парето была односвязной, достаточно, чтобы размерность задачи соответствовала с числом критериев как  $l \geq n$ . В дальнейшем будем считать, что это условие выполняется. Наиболее простым примером области Парето при  $l = 1$ ,  $n = 1$  является отрезок прямой, заключенный между точками локальных оптимумов  $\hat{x}_1, \hat{x}_2$ .

Для  $l = n = 2$  такая область реализуется в виде плоской кривой, а при  $l = 3$ ,  $n = 4$  — область может иметь вид, изображенный на рис. 15.1.



Поскольку в элементах системы решаются однокритериальные задачи оптимизации, сами эти элементы представляют собой простые системы. Собственно, другая интерпретация элементов не конструктивна с точки зрения анализа системы в целом. Таким образом, передаточные функции элементов, учитывающая введенное в п. 1.1 многообразие связей, в общем виде можно записать как

$$F_j: \{\Gamma_j \times U_j\} \rightarrow \{W_j \times U_j\}, \quad j \neq i, \quad i \in \{J\}, \quad (15.10)$$

где  $\{\Gamma_j \times U_j\}$  — множество входов,  $\{W_j \times U_j\}$  — множество выходов.

В случае отсутствия одноуровневых связей выражение (15.10) примет вид

$$F_j: \{\Gamma_j\} \rightarrow \{W_j\}, \quad (15.11)$$

В принятых ранее терминах для произвольной структуры передаточные функции элементов запишутся так:

$$F_i: \{X\} \times \{U_i\} \rightarrow \{Y_i\} \times \{U_i\}, \quad j \neq i, \quad i \in \{I\}, \quad (15.12)$$

При этом множество координирующих воздействий при постановке однокритериальной задачи представляет собой множество  $\{X\}$ , а множество выходов —  $\{Y_i\}$ .

В описанных условиях многокритериальная задача оптимизации принципиально может иметь две постановки.

1. Предполагается, что выходящий элемент при формировании множества входов  $\{U_i\}$  и входящие элементы поименованной функции распределения и организации варьирования элементов множества  $\{X\}$  выполняет также функцию управления частными критериями. Эта функция может рассматриваться как стимулирование независимых элементов в соответствии с некоторой процедурой, известной на верхнем уровне. Стимулирующая процедура реализуется в том случае, если существует механизм, связывающий частные интересы, выражаемые частными целевыми функциями, с глобальными интересами системы. Роль такого механизма заключается в установлении меры влияния частных критериев на глобальное решение задачи. В этом случае выражение для передаточной функции элемента принимает вид

$$F_i: \{X\} \times \{U_i\} \times \{U_j\} \rightarrow \{Y_i\} \times \{U_i\}, \quad j \neq i, \quad i \in \{I\}, \quad (15.13)$$

для частной целевой функции — вид

$$g_i: \{U_i\} \times \{X\} \times \{Y_j\} \times \{U_j\} \rightarrow \{V_i\} \times \{U_i\}, \quad j \neq i, \quad i \in \{I\}, \quad (15.14)$$

При этом подходе предполагается, что благодаря стимулирующему (играющему или поощряющему) воздействию на частные критерии точки локальных оптимумов будут двигаться от своих собственных значений таким образом, что вновь образованная под влиянием управляющего воздействия область Парето будет достаточно сжатой, чтобы на ранних этапах проектирования принять ее за многомерную точку  $\bar{X}$  — решение задачи.

Основной проблемой при решении задачи первым путем является нахождение оптимальных управлений  $u_i \in \{U_i\}$ ,  $i \in \{I\}$  и, прежде всего, разработка самой процедуры их генерирования.

т. е. принципа многокритериальной оптимизации. Если предположить, что цель выходящего элемента формализуема и может послужить основой для выработки таких управлений, то задача сведется к однокритериальной задаче оптимизации на сложной структуре. Такую задачу будем называть несобственной многокритериальной задачей оптимизации.

Отношение этого аспекта многокритериальности к классу несобственных задач определяется прежде всего присутствием в задаче в явном виде глобального критерия, указывающего на однокритериальный характер ее постановки. Вместе с тем, структура математической модели системы сложная, что обеспечивает существование множества частных критериев и позволяет говорить о многокритериальном аспекте.

По-видимому, впервые несобственную многокритериальную задачу оптимизации сформулировал М. Мисрович [225], разработав математическую теорию координации. В настоящее время единственным методом решения такой задачи применительно к исследовательскому проектированию является метод "согласованной оптимизации подсистем судна". Метод разработан В. М. Пашиным и изложен в [267, 268].

Следует отметить, что необходимость построения глобального критерия существенно ограничивает круг задач исследовательского проектирования боевых кораблей, в которых этот метод мог бы быть использован. Формализовать же управление, не задавая целью системы, не представляется возможным. Кроме того, задача вырождается в задачу нелинейного программирования как только система ограничений, рассматриваемая в методе В. М. Пашина, теряет актуальность. Вместе с тем, метод согласованной оптимизации подсистем судна наглядно демонстрирует возможность получения формального компромиссного решения при нескольких частных критериях.

Вторая постановка многокритериальной задачи оптимизации получила название собственной.

2. Предполагается, что передаточные функции элементов системы и частные целевые функции имеют вид

$$F_i: \{X\} \times \{U_i\} \rightarrow \{Y_i\} \times \{U_i\};$$

$$g_i: \{X\} \times \{Y_i\} \times \{U_i\} \rightarrow \{V_i\} \times \{U_i\}, \quad j \neq i, \quad i \in \{I\}, \quad (15.15)$$

т. е. предполагается, что в математической модели корабля частные целевые функции подсистем не будут зависеть от стимулирующих воздействий  $\gamma_i$  или, другими словами, штраффункции и поощряющие воздействия не будут применяться к элементам вообще.

В этом случае решение многокритериальной задачи оптимизации представляет собой вектор  $\hat{x} \in \{X^*\}$ , отвечающий некоторому выдвигаемому принципу многокритериальной оптимальности. Все существующие методы решения многокритериальной задачи оптимизации, отвечающие второй постановке, т. е. опирающиеся на предположения (15.15), основываются на формулировании такого принципа.

Анализируя развитие теории проектирования, можно видеть, что идея выбора предпочтительного варианта корабля непременно использует некоторый аксиоматический аппарат, позволяющий установить это предпочтение. Так, в задаче определения главных элементов корабля предполагается, что сочетание элементов палубной нагрузки определяется априорно и, следовательно, принцип выбора такого сочетания лежит за пределами теории проектирования. Затем, в задаче оптимизации ТТХ корабля в качестве аксиомы выбора вводится предположение о том, что каждому варианту корабля можно поставить в соответствие количественную оценку качества его функционирования. Формализация этого принципа нашла свое выражение в построении критерия оптимальности. Для устранения неопределенности, возникающей в многокритериальной задаче оптимизации, необходимы некоторые дополнительные условия, подобно тому как это можно наблюдать при переходе от задачи определения главных элементов корабля к задаче оптимизации ТТХ. При этом, расширяя аксиоматический аппарат задачи, нет никаких оснований для исключения ранее введенных принципов выбора.

Таким образом, необходимо иметь два условия многокритериальной оптимальности, первое из которых отвечает аксиоме выбора в однокритериальной задаче, а второе формулируется в виде свертки частных критериев. В этом случае решение задачи достигается в точке  $\hat{x} \in \{X^*\}$ , отвечающей условию

$$G[g_i(\hat{x})] \leq G[g_i(x)], \quad (15.16)$$

$$i \in \{I\}, \hat{x}, \forall x \in \{X^*\},$$

где  $G[g_i(x)]$  — свертка частных критериев.

Введение свертки частных критериев ни в коем случае не означает сведение многокритериальной задачи оптимизации к однокритериальной, так как в общем виде свертка  $G$  не содержит смысла критерия многоцелевой системы, а ее конкретное формальное выражение остается неопределенным.

Итак, многокритериальная задача оптимизации, отвечающая идее поиска компромисса при проектировании, может задаваться четверкой:

$$(\{F\}, \{g\}, G, \{X^*\}), \quad (15.17)$$

где  $\{F\}$  — множество передаточных функций (моделей) элементов системы;  $\{g\}$  — множество частных целевых функций;  $G$  — свертка частных критериев;  $\{X^*\}$  — множество сочетаний значимых независимых переменных, принадлежащих области Парето.

Решением многокритериальной задачи оптимизации ТТХ корабля, заданной четверкой (15.17), называется элемент  $\hat{x} \in \{X^*\}$ , удовлетворяющий условиям

$$\left. \begin{aligned} G(\hat{x}) &\leq G(x); \\ G(x) &= G[g_i(x)], \\ i &\in \{I\}, \hat{x}, \forall x \in \{X^*\} \end{aligned} \right\} \quad (15.18)$$

и представляющий собой  $l$ -мерный вектор с компонентами — оптимальными значениями ТТХ корабля.

С проекцией точки зрения решение многокритериальной задачи оптимизации представляет собой некоторый компромисс между ТТХ корабля, отвечающими локальным оптимальным точкам элементов математической модели. Это решение количественно отражает факт предпочтения интересов одних элементов системы интересам других. Из самой постановки компромиссной задачи следует, что решение ее должно существовать и оно единственно.

### 14.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕМЕНТАРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ

В предыдущем параграфе настоящей главы в общем виде была изложена проблема многокритериальной оптимизации ТТХ корабля. Решение этой проблемы открывает принципиально новые перспективы в анализе сложных систем, позволяет получать количественные оценки взаимодействия тех или иных подсистем корабля. Вместе с тем, при существенном повышении содержательности системного анализа математических моделей корабля, характеризующихся большой сложностью и многомерностью, значительно затрудняется интерпретация результатов, что не позволяет выявлять конкретные единичные влияния отдельных факторов на комплексивную точку решения. Однако, если даже это было бы возможно, анализ численно найденных оптимальных решений не обязательно приводит к пониманию характера движения решений во всем возможном диапазоне их изменения. В этом смысле гораздо больший интерес представляют так называемые элементарные модели.

Целесообразность исследования элементарных моделей основывается на одном из основных предположений системного анализа о том, что разбиение системы на подсистемы и элементы может вестись до сколь угодно большой степени подробности, при этом конечные элементы разбиения всегда будут обладать необходимой содержательностью, обеспечивающей возможность на базе полученных при такой декомпозиции элементов с учетом всех действующих связей синтезировать исходную систему. С практической точки зрения такая процедура вряд ли целесообразна, но методологически изложенные обстоятельства позволяют считать анализ элементарных моделей конструктивным.

Актуальность разработки элементарных моделей не ограничивается изложенными соображениями. Во многих случаях для решения задач исследовательского проектирования достаточно иметь агрегированные модели, дающие качественную картину взаимодействия основных свойств корабля. Такие модели по своей структурной простоте могут оказаться близкими к элементарным. Кроме того, анализируя функционирование элементарных моделей, можно сравнительно легко получать результа-

ты системного характера и интерпретировать их применительно к практическим случаям.

Прием построения моделей, обладающих минимально необходимой содержательностью, не является новым и используется практически во всех разделах естествознания. Суть этого приема заключается в сохранении минимального числа отличительных структурных признаков сложной системы, т. е. многоэлементности (модель системы должна состоять хотя бы из двух элементов) и многообразия системных связей, обеспечивающих содержательный системный анализ и последующую интерпретацию наблюдаемых результатов. Применительно к рассматриваемым здесь классам элементарных моделей необходимо потребовать выполнения дополнительных условий, обуславливаемых особенностями основной задачи проектирования.

Таким образом, для обеспечения инструментальных исследований поведения оптимальных решений, получаемых на многоэлементных моделях исследовательского проектирования, вводится новое понятие — элементарная модель. Другие математические модели исследовательского проектирования, в более полной мере отражающие реально протекающие на практике процессы и предназначенные для получения количественных результатов, в дальнейшем в отличие от элементарных моделей будут называться реальными.

**Определение.** Под элементарной моделью мы понимаем математическую модель, построенную на минимальном уровне структурной и параметрической содержательности, передаточные функции элементов которой отвечают общим начальным и граничным условиям, характерным для постановки основной задачи проектирования.

При этом, упомянутые в определении условия могут быть записаны следующим образом (см. п. 14.2):

$$\left. \begin{aligned} S(x_{min}) &= S_0; & S(x) &= \infty; \\ S(x) &> 0, & \nabla S(x) &\geq 0, & \nabla^2 S(x) &\geq 0, \\ x_{min} &\geq 0, & x &\in \{X^r\}. \end{aligned} \right\} \quad (15.19)$$

где  $S(x)$  — ресурсный показатель системы.

$$\left. \begin{aligned} E(x_{\min}) &= 0, \quad E(x) = E_{\alpha}; \\ E(x) &> 0, \quad \forall E(x) \geq 0; \\ x_{\min} &\geq 0, \quad x \in \{X'\}, \end{aligned} \right\} \quad (15.20)$$

где  $E(x)$  — показатель эффективности.

Наиболее простым выражением для ресурсного показателя  $i$ -го элемента, отвечающим условиям (15.19), является линейная функция вида

$$s_i(x) = \sum_{j=1}^n \delta_{ij} x_j + c_i, \quad i = [1, n] \quad (15.21)$$

где коэффициенты  $\delta_{ij}$  могут быть интерпретированы как удельные стоимости переменных  $x_j$  в  $i$ -ом элементе, а  $c_i$  — свободный член, отвечающий в (15.19) значению ресурсного показателя  $S_{\alpha}$  при  $x = x_{\min}$ . В данном случае не вносятся в виду, представляем ли выражение (15.21) стоимость создания или содержания корабля и соотносится ли эта стоимость с боевой эффективностью корабля в какой-нибудь отдельной задаче, либо она приходится на каждый год его эксплуатации (весь срок службы) (см. главу 12). Однако в любом случае считается, что значение ресурсного показателя, вычисленное по выражению (15.21), представляет собой те затраты, которые были произведены для обеспечения значения соответствующего показателя эффективности. При этом, переменные  $x_j$  являются компонентами  $i$ -мерного вектора  $x$  независимых переменных задачи.

В качестве элементарного показателя эффективности, отвечающего условиям (15.20) и имеющего наименьшее число управляющих параметров (всего один), можно предложить одномерную функцию вида

$$e_i(x) = 1 - \exp(-\alpha_i x), \quad i = [1, n] \quad (15.22)$$

В выражении (15.22) коэффициент  $\alpha_i$  представляет собой удельную эффективность элемента, приходящуюся на одну единицу независимой переменной  $x_j$ . Величина  $e_i$  может рассматриваться как вероятность некоторого случайного события, характеризующего "собственную" эффективность  $i$ -го элемента, т.е. такую эффективность, которая обеспечивается только свойства-

ми самого этого элемента при каждом значении переменной  $x$ . Выражение (15.22) широко используется в моделях оценки боевой эффективности кораблей как экспоненциальная запись закона поражения цели А. Н. Колмогорова [170] (см. главу 13). Представление модельной функции типа (15.22) в одномерном виде также довольно часто встречается в математических моделях оценки многоэлементных систем. Так, достаточно подробное обоснование этого допущения приводится Дж. Ф. Нейманом и О. Моргенштерном в [290]. Однако в нашем случае наиболее сильным основанием для одномерного представления передаточной функции является стремление получить модель минимальной содержательности.

В связи с линейным характером выражения для ресурсного показателя и экспоненциальным видом показателя эффективности, рассматриваемый класс элементарных моделей получил название линейно-экспоненциальных, сокращенно — ЛЭМ.

Для учета взаимодействия элементов в ЛЭМ вводится еще одно допущение, широко применяемое при моделировании. Будем считать, что влияние  $j$ -го элемента на  $i$ -й элемент характеризуется величиной  $c_{ij}$ . При этом предполагается, что события, определяющие исход операции, в рамках которой функционирует какой-либо элемент системы, представляет собой марковскую последовательность. Тогда показатель эффективности элемента с учетом действующих связей может быть записан в виде:

$$E_i(x) = c_i(x) \prod_j c_{ij}(x_j), \quad i \neq j. \quad (15.23)$$

Здесь необходимо отметить, что хотя в реальных моделях существует бесконечное множество форм функционального взаимодействия элементов, представление (15.23) обеспечивает необходимую интерпретацию связей на элементарном уровне и является, таким образом, содержательным.

Запись (15.23) предполагает, что связь, существующая между элементами системы, носит положительный характер. Для получения более полного многообразия форм взаимодействия элементов при системном анализе элементарных моделей может



рассматриваться также отрицательная связь, моделируемая выражением:

$$\bar{E}_i(x) = 1 - \exp(-V(\alpha, x)), \quad i = [1, n]. \quad (15.24)$$

Функция  $\bar{E}_i(x)$  моделирует картину изменения эффективности противоположную той, которой отвечает функция  $E_i(x)$ , и удовлетворяет следующим начальным и граничным условиям:

$$\begin{aligned} \bar{E}_i(0) = 1, \quad \bar{E}_i(x) &\leq 0; \\ \bar{E}_i(x) > 0, \quad \forall \bar{E}_i(x) &\leq 0; \\ x_{min} = 0, \quad x \in \{X^j\}, \quad i &= [1, n]. \end{aligned} \quad (15.25)$$

В дальнейшем для простоты изложения считается, что условие  $x_{min} = 0$  выполняется всегда.

При рассмотрении различных модельных многообразий, обусловленных вводимыми связями между элементами, возникает необходимость компактного изображения возможных случаев, так как обращение каждый раз к графической иллюстрации затрудняет изложение вопроса. Для достижения поставленной цели понадобится введение некоторого преобразования, содержащего индикаторно необходимую информацию и позволяющего связывать вектор  $e$  — вектор собственной эффективности элементов  $E$ , с вектором  $E$  — показателей эффективности, построенных с учетом действующих одноуровневых связей,  $E_i(x)$ . Для индикаторно действующих связей предлагается следующая квадратная матрица

$$U = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} & \dots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} & \dots & u_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{n1} & u_{n2} & u_{n3} & \dots & u_{nn} \end{pmatrix} \quad (15.26)$$

Элементы матрицы  $U$  представляют собой признаковые величины, принимающие следующие значения:  $u_{ij} = 0$ , когда связь между  $i$ -м и  $j$ -м элементом отсутствует;  $u_{ij} = 1$ , когда от  $i$ -го к  $j$ -му элементу (или от  $i$ -го к  $i$ -му) действует положительная связь;  $u_{ij} =$

$-1$ , когда от  $i$ -го к  $j$ -му элементу действует отрицательная связь. Так, например, матрица

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

означает, что между элементами системы действуют связи, как это показано на рис. 15.2.

Для выполнения действий над матрицей  $U$  введем оператор  $L$ , представляющий собой логарифмический оператор вида

$$Le^i = (\lg e_1, \lg e_2, \lg e_3, \dots, \lg e_n).$$

В этом случае связь между векторами  $e$  и  $E$  может быть записана следующим образом

$$Le^i = U \cdot LE^i. \quad (15.27)$$

Для того, чтобы воспользоваться преобразованием (15.27) необходимо определить введенную ранее "отрицательную единицу" — признак отрицательной связи  $-I$  (в дальнейшем для простоты везде будет использоваться запись  $-I = -1$  по определению). Исходя из введенных ранее выражений для положительной и отрицательной связей и существующих правил умножения матриц, условием для нахождения  $-I$  будет:

$$\lg e_i(-I) = \lg \bar{E}_i,$$

или

$$-I = \lg \bar{E}_i / \lg e_i. \quad (15.28)$$

Выражение (15.28) позволяет пользоваться индикаторной матрицей  $U$ , не прибегая к введению новых правил оперирования. Таким образом, вектор показателей эффективности элементов моделируемой системы с учетом действующих связей определяется из выражения (15.27).

В соответствии с известным многообразным целевым функцией типа "стоимость—эффективность" в качестве общего для



Рис. 15.2

вех элементов частного критерия оптимальности рассматривается критерий третьего типа в виде:

$$d(x) = S(x)/E(x). \quad (15.29)$$

Как показано в п. 14.2, критерии типа (15.29) являются во всяком случае псевдомультипликативными функциями в пространстве независимых переменных и, следовательно, удовлетворяют условию унимодальности. Кроме этого, в [14] приводятся условия корректности решений многокритериальной задачи оптимизации, получаемых с использованием рассматриваемого класса линейно-экономических моделей. Показано, что выполнение этих условий обеспечивается для любых  $x \in \{X^*\}$ . Таким образом, все многообразие ситуаций, которые будут рассмотрены в дальнейшем, обозначается единственностью как локальных, так и глобальных решений, а глобальные решения, получаемые в результате моделирования, лежат внутри области  $\{X^*\}$  (компоненты вектора  $\bar{x}$  принимают конечные положительные значения).

Нередко при введении в рассмотрение элементарных моделей встает вопрос об их адекватности. В связи с этим следует заметить, что качество любых моделей оценивается прежде всего с точки зрения их полезности для получения решений практических задач, а не с точки зрения их адекватности объектам моделирования. При этом опыт использования метода моделирования показывает, что большая полнота может иметь место и тогда, когда высокой степенью адекватности получить не удастся.

Целью построения и последующего анализа функционирования ЛЭМ является получение новых качественных результатов системного характера на основе исследования компромиссных решений многокритериальных задач оптимизации. Очевидно, что наибольшей привлекательностью в этом случае будет обладать не само решение, получаемое тем или иным методом, а вся совокупность таких решений, образующаяся при рассмотрении систем с различной относительной эффективностью. Именно такая постановка задачи может дать возможность наблюдать качественно новые результаты, которые не могли бы быть получены при решении многокритериальных задач на реальных мо-

делях. Семейство решений, образующихся за счет варьирования относительной эффективности элементов, сопровождается соответствующим анализом результатов. При этом для обеспечения сравнимости результатов и выявления влияния изменения удельной эффективности того или другого элемента на решение задачи, в дальнейших рассуждениях удельные затраты элементов принимаются равными и постоянными, т. е.  $b_1 = b = \text{const}$ ;  $c_1 = c = \text{const}$ . Особый интерес при выполнении такого анализа должна вызывать возможная проектная интерпретация результатов, получаемых исключительно формальным образом, т. е. когда они могут быть не истолкованы с позиций практического проектирования.

При рассмотрении принципов декомпозиции математических моделей особое внимание уделяется эшелонированию и стратификации, обеспечивающим постановку многокритериальной задачи оптимизации. В настоящем учебнике рассматриваются только двухуровневые элементарные модели, т. е. модели, содержащие элементы только одного уровня, замыкающиеся на один элемент верхнего уровня — собственно систему, поэтому один элемент верхнего уровня — собственно систему, содержащую элементы только одного уровня, будут обладать ЛЭМ, со-мму минимальной содержательностью будут обладать ЛЭМ, со-держащие два элемента, не связанные между собой. Анализ ЛЭМ многоуровневой структуры с многообразием связей между элементами приведен в [14].

Для того, чтобы обеспечить наглядность получаемых результатов в качестве независимых переменных при элементарном анализе, как правило, рассматривается вектор  $x = (x_1, x_2)^T$ . При этом считается, что областью допустимых решений является все положительное полупространство  $E^2$ . Число компонент вектора  $x$  принято минимальным по числу элементов, которые они характеризуют. В этом случае обеспечивается односвязность области Парето (в отдельных случаях могут рассматриваться и многосвязные паретовские области). При исследовальском проектировании в качестве компонентов вектора  $x$  могли бы выступать число ракет или ступеней артиллерии, обеспечивающих решение одной из двух рассматриваемых задач, а также любая другая переменная, количественно характеризующая та-

кое развитие элемента системы, которое обеспечивает приращение как ресурсного показателя, так и показателя эффективности.

Для получения локальных оптимальных точек элементов ЛЭМ выполняются следующие преобразования, связанные с исследованием первой производной частной целевой функции. Поскольку функция  $g_i$  унимодальна, то ее точка минимума единственна и должна отвечать условию равенства нулю первой производной

$$\forall g_i = E_i \nabla X_i - S_i \nabla E_i = 0, \quad i = [1, n]. \quad (15.30)$$

Решение (15.30) может быть получено как решение системы двух уравнений в частных производных

$$\left. \begin{aligned} E_i S_{ij}^* - S_i E_{ij}^* &= 0, \\ E_i S_{ij}^* - S_i E_{ij}^* &= 0, \end{aligned} \right\} \quad i = [1, n], \quad (15.31)$$

где  $S_{ij}^*$ ,  $E_{ij}^*$  — частные производные соответствующих показателей  $i$ -го элемента по  $j$ -й переменной.

Для выделения области Парето воспользуемся условием С. Карвина, полученным для выпуклых функций типа (15.29),

$$\min_{\lambda, \varepsilon} \sum_{i=1}^n \lambda_i \varepsilon_i$$

или

$$\forall \left[ \sum_{i=1}^n \lambda_i \varepsilon_i \right] = 0 \quad (15.32)$$

В тех случаях, когда возможно привести (15.32) к виду линейной функции  $\chi_i(x_i)$  с исключенным параметром  $\lambda_i$ , условие (15.32) целесообразно также представлять в виде системы уравнений в частных производных, в противном случае точки области Парето вырабатываются в результате решения задачи поиска минимума линейной свертки частных критериев. Пример вида области Парето для ЛЭМ при  $n = 3$  показан на рис. 15.3, а.

В соответствии с принципом стратификации и условиями построения ЛЭМ, оговоренными выше, частные критерии типа "стоимость — эффективность" элементов ЛЭМ могут быть записаны в следующем виде:

$$g_i(x_i) = S_i(x_i)/E_i(x_i); \quad g_i(x_i) = S_i(x_i)/E_i(x_i), \quad (15.33)$$

где  $S_i(x_i)$  — ресурсный показатель системы, определяемый по выражению (15.21):

$$S_i(x_i) = b_i(x_i + x_i) + 2c_i \quad (15.34)$$

$E_i(x_i)$ ,  $E_j(x_j)$  — показатели эффективности элементов, определяемые выражением (15.22).

С проектной точки зрения частные критерии (15.33) отражают основную особенность стратификации, согласно которой в каждом элементе структуры рассматривается вся система (что находит выражение в виде ресурсного показателя), решающая одну из возможных на нее частных задач с эффективностью, оцениваемой с помощью частных показателей  $E_i(x_i)$ ,  $E_j(x_j)$ . При этом, учитывая аддитивный характер стоимости, ресурсный показатель системы рассматривается как сумма частных ресурсных показателей, а то время как показателем эффективности элементов характеризуются частными удельными эффективностями  $g_i$ , принимаемыми для каждой конкретной системы постоянными.

Рассматриваемой ЛЭМ соответствует индикаторная матрица вида:

$$U = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

а в общем случае для  $n$  элементов

$$U = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

и частные показатели эффективности элементов

$$I \cdot E^i = L e^i \times U \Rightarrow E = (e_1, e_2)^T \quad (15.35)$$

или, в общем случае,

$$E = (e_1, e_2, \dots, e_n)^T.$$

Подставляя выражение для показателя эффективности в ресурсного показателя (15.34) в (15.31), получим условие для нахождения локального оптимума, например для  $i = 1$

$$\left. \begin{aligned} \delta e_1 - \delta e_{11}^* &= 0; \\ \delta e_2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (15.36)$$

Из (15.36) видно, что решение, удовлетворяющее обоим уравнениям, может быть получено в точке  $x = (0, -2c/b)^T$ . Такое решение не отвечает принятой области допустимых решений и должно быть отброшено. Любое приемлемое решение может быть получено только при отрицательных значениях  $\lambda_1$ , в связи с чем система (15.36) примет вид

$$\left. \begin{aligned} \delta e_1 - \delta e_{11}^* &= 0; \\ \delta e_2 &> 0. \end{aligned} \right\} \quad (15.37)$$

В этом случае в связи с монотонным характером изменения частного критерия по второй переменной (в соответствии со вторым условием (15.37)) минимальное значение целевой функции всегда будет отвечать условию  $\hat{x}_{12} = 0$  (далее в дальнейшем для обозначения оптимальных решений принимается следующая нумерация:  $\hat{x}_{ij}$  — локально-оптимальное решение  $i$ -го элемента по  $j$ -й переменной;  $\hat{x}_i$  — локально-оптимальный вектор  $i$ -го элемента). Поэтому оптимальное значение переменной  $\hat{x}_{11}$  может быть найдено из выражения

$$b/S - e_{11}^*/e_1. \quad (15.38)$$

Для рассматриваемой модели условие локальной оптимальности примет вид уравнения

$$\lambda_1 x_1 + (1 + 2x_1/b) = \exp(\lambda_1 x_1). \quad (15.39)$$

Наблюдая характер изменения функций, заданных в левой и правой частях равенства (15.39), можно видеть, что при любых значениях входящих в уравнение (15.39) коэффициентов решение его существует и единственно.

Для построения области Парето воспользуемся уравнением (15.32):

$$\nabla G(\lambda_1 S/e_1 + \lambda_2 S/e_2) = \nabla S(\lambda_1/e_1 + \lambda_2/e_2) + S \nabla(\lambda_1/e_1 + \lambda_2/e_2) = 0, \quad (15.40)$$

или в частных производных:

$$\left. \begin{aligned} b(\lambda_1/e_1 + \lambda_2/e_2) - S \lambda_1 e_{11}^*/e_1^2 + 2\lambda_1 \\ b(\lambda_1/e_1 + \lambda_2/e_2) - S \lambda_2 e_{22}^*/e_2^2 + 2\lambda_2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow (S e_{11}^* - b e_1)(S e_{22}^* - b e_2) = b^2 e_1 e_2. \quad (15.41)$$

Выражение (15.41) представляет собой некую функцию  $x_1(x_2)$ , проходящую через все точки области Парето. При получении (15.41) было принято  $\lambda_1 = 1$ , что, разумеется, не влияет на окончательный результат. В случае рассмотрения конечного числа элементов одного уровня условие (15.40) примет вид

$$\nabla S \sum_{i=1}^n \lambda_i / e_i + S \nabla \sum_{i=1}^n \lambda_i / e_i = 0 \quad (15.42)$$

или, в частных производных при исключении коэффициентов  $\lambda_i$ , для любой произвольной пары частных критериев:

$$(S e_{11}^* - b e_1)(S e_{22}^* - b e_2) = b^2 e_1 e_2, \quad i \in \{I\}, \quad j \in \{J\}. \quad (15.43)$$

При этом область Парето будет представлять собой  $n$ -мерный неевклидовы симплекс с ребрами, образованными функциями типа (15.43). Внешний вид области Парето для рассматриваемого случая ( $n = 2$ ), изображен на рис. 15.3, б. Здесь и в дальнейшем в расчетных примерах приняты следующие исходные данные:

$$\lambda_1 = 0.1; \quad \lambda_2 = [0, \infty]; \quad b = 5; \quad c = 10.$$

Из рисунка видно, что локальная оптимальная точка первого элемента отвечает значению  $\hat{x}_1 = (7.8; 0)^T$ , в то время как соот-

ветствующая точка второго элемента при варьировании  $\alpha_1 = [0, \infty)$  принимает значения  $\hat{x}_2 = [0, \infty)$ , образуя каждый раз новую область Парето, представляющую собой линию  $\hat{x}_1, \hat{x}_2$ .

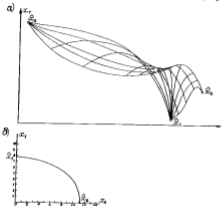


Рис. 15.3

непрямую обращенную выпуклостью в сторону, противоположную началу координат.

#### Анализ ЛЭМ эшелонированной структуры

По аналогии с ЛЭМ, востребованной применительно к стратифицированной структуре, рассматривается ЛЭМ, обладающая

эшелонированной структурой. В этом случае в соответствии с принципом эшелонирования ресурсные показатели элементов принимают вид

$$s_i(x) = b x_i + c, \quad i = [1, 2] \quad (15.44)$$

так что

$$S(x) = \sum_{i=1}^2 s_i(x) \quad (15.45)$$

В этом случае частные критерии элементов ЛЭМ равны:

$$g_1(x) = s_1(x)/E_1(x); \quad g_2(x) = s_2(x)/E_2(x). \quad (15.46)$$

В целях обобщения сопоставительного анализа мы также рассмотрим случай двух не связанных между собой элементов, как это было принято при стратификации. Очевидно, что для эшелонированной структуры предположение об отсутствии связей между элементами не актуально. Это следует из самого принципа эшелонирования, предполагающего разбиение системы на материальные части, образующие в совокупности единое целое. Вместе с тем такая постановка задачи интересна с методической точки зрения.

Локальные оптимальные решения элементов относительно критериев (15.46) представляют собой прямые, проходящие параллельно осам координат независимой переменной другого элемента и через оптимальное значение переменной рассматриваемого элемента (рис. 15.4). Линия  $AB$  — решение первого элемента,  $CD$  — второго). Каждая точка этих прямых отвечает условию минимума соответствующей частной целевой функции (15.46)



Рис. 15.4

$$\nabla(g_i/c_i) = (\nabla s_i/c_i - s_i \nabla c_i)/c_i^2 = 0, \quad i = [1, 2] \quad (15.47)$$

или

$$\delta c_i - \lambda_i c_i' = 0. \quad (15.48)$$

Для рассматриваемой ЛЭМ (15.48) примет вид, подобно (15.39)

$$a_i c_i + (1 + c_{0i}/b) = \text{стр}(a_i c_i), \quad i = [1, 2]. \quad (15.49)$$

При принятых ранее условиях для  $a_i = 0,1$ ,  $\lambda_i = 5,72$ .

Полученные локальные решения отражают тот факт, что принятые частные целевые функции не зависят от переменных других элементов. Таким образом, область Парето вырождается в точку пересечения линий локальных оптимальных решений, которой безусловно соответствует решение многокритериальной задачи оптимизации — компромиссное решение. Условия нахождения этой компромиссной точки можно записать в виде

$$b = x_1 c_{11}' / a_1 = x_2 c_{21}' / a_2. \quad (15.50)$$

Иными словами, эшелонированная структура при отсутствии связей между элементами не создает конфликтную ситуацию между локальными интересами этих элементов и, следовательно, с точки зрения теории компромиссов интерес не представляет. Можно также отметить, что решения, получаемые в случае эшелонирования, отвечают меньшим значениям локально-оптимальных переменных, чем соответствующие решения при стратификации (см. рис. 15.3). Последнее обстоятельство объясняется влиянием остаточной стоимости соседнего элемента на частное решение задачи при стратификации.

Рассмотренные выше инструментальные средства элементарного моделирования могут использоваться применительно к гораздо большему многообразию структурных форм (см. [141]). При этом, наряду с локальными оптимальными решениями и точками области Парето, приемы получения которых были здесь рассмотрены, особый интерес представляют компромиссные точки разрешения области Парето, т. е. решения многокритериальной задачи оптимизации, теоретические аспекты которой изложены в следующих параграфах настоящего учебника.

### 15.3. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫХ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ. ЭВРИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ НЕСУБЪЕКТИВНЫХ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫХ ЗАДАЧ

Как уже отмечалось, в отличие от однокритериальной задачи оптимизации многокритериальная задача всегда обладает некоторой неопределенностью, связанной с отсутствием единственной меры между частными критериями. Для раскрытия этой неопределенности необходимы дополнительные условия, формально выражающие представление проектанта о многокритериальном оптимуме или, иначе говоря, о мере компромисса между рассматриваемыми аспектами ММК.

В зависимости от степени формализации процедуры раскрытия неопределенности задачи, методы решения многокритериальных задач оптимизации условно можно разделить на эвристические и формальные. Эвристические методы решения многокритериальных задач нашли свое применение и начали развиваться задолго до появления формальных методов. В настоящее время эта группа методов является наиболее многочисленной и методов, представляющих ее, достаточно хорошо разработаны.

Идея эвристического подхода заключается в предложении схемы решения задачи, принимаемой из некоторых субъективных соображений. Допустимость использования такого подхода вытекает из основного утверждения, разделяемого его сторонниками, о том, что в ММК принципиально не содержится объективной информации, способной обеспечить доказательное решение задачи. Введя некоторое обобщение, можно сказать, что группа эвристических методов состоит из:

- методов, использующих постулирование сверхки частных критериев в некоторый глобальный;
- методов, основанных на назначении "весов" частных критериев, когда глобальный критерий представляется в виде линейной сверхки (эти методы можно было бы отнести к методам, основанным на постулировании сверхки частных критериев, однако исторически сложилось так, что их обычно выделают в самостоятельную группу);

— методов, базирующихся на выделении всех, за исключением какого-либо одного, частных критериев в ограничении, или установлении предпочтения на частных критериях.

Очевидно, что постулирование свертки частных критериев, т. е. введение в задачу некоторого функционала, объединяющего так или иначе все частные критерии, сводит задачу к однокритериальной. Тем самым сущность проблемы многокритериальности, заключающаяся в неопределенности задачи, исключается из рассмотрения. Каких-либо общих подходов к постулированию свертки частных критериев не существует и ответственность за адекватность получаемого решения в этом случае полностью ложится на автора свертки, принимающего ее из интуитивных соображений на основе неформального анализа конкретных особенностей задачи. Поскольку такой подход в рамках теории конструктивно описать не может, его применение с целью обеспечения доказательного решения проблемы невозможно.

Наибольшее распространение получили методы, основанные на назначении "весов" частных критериев. Методологической базой этих методов является так называемый метод экспертных оценок, основанный на опросе мнения одного или группы экспертов о возможных значениях "весов" частных критериев. При этом свертка частных критериев имеет следующий вид:

$$G(x) = \sum_i \alpha_i g_i(x), \quad x \in \{X^0\}, \quad i \in \{I\}. \quad (15.51)$$

В отдельных методах на "весах"  $\alpha_i$  накладываются дополнительные ограничения

$$\sum_i \alpha_i = 1,$$

что упрощает процедуру назначения "весов" частным критериям. Все методы, основанные на принципе назначения "весов", можно разделить на методы, позволяющие рассуждать коэффициенты относительной важности ("веса") критериев по информации, получаемой от одного эксперта (так, например, непосредственная численная оценка, оценка в баллах, метод Чермена—Асофа и т. п.), и методы, при использовании которых можно получить только обобщенный для всех экспертов ряд коэффициентов (ранжирование, метод Терстоуна и т. д.).

В ряде случаев при определении "весов" частных критериев предполагается их аддитивность, однако такое допущение годится в себе сильное противоречие, заключающееся в том, что аддитивное представление частных критериев исключает всю дальнейшую содержательность многокритериальной задачи, возникающую именно в результате несравнимости частных оценок. В противном случае любая многокритериальная задача оптимизации могла бы быть свободно представлена как однокритериальная с критерием в виде простой суммы частных оценок, и любая однокритериальная задача могла бы быть представлена в виде бесконечного числа многокритериальных задач путем выполнения над критерием ряда эквивалентных операций. Когда предполагается неаддитивность частных критериев, "весовые" коэффициенты выполняют также функцию нормирования (масштабирования) частных критериев. Иногда, прежде чем приступить к сравнительной оценке критериев, заблаговременно выполняют их нормализацию. При этом для нормализации частных критериев используется линейное преобразование

$$\bar{g}_i(x) = \alpha_i g_i(x) + \beta_i, \quad i \in \{I\}$$

или подобное этому [220]. В качестве наиболее распространенных способов нормализации можно указать следующие [233]: естественная нормализация

$$\bar{g}_i(x) = (g_i(x) - \min g_i(x)) / (\max g_i(x) - \min g_i(x)),$$

нормализация сравнения

$$\bar{g}_i(x) = g_i(x) / \max g_i(x),$$

нормализация Савиджа

$$\bar{g}_i(x) = \max g_i(x) - g_i(x),$$

нормализация осреднения

$$\bar{g}_i(x) = g_i(x) / \sum_i g_i(x).$$

Следует считать, что нормализация частных критериев еще недостаточно, чтобы считать их сравнимыми, т. е. способными в сложении для построения глобального критерия в виде адди-

тивной сверстки (15.51). К сожалению, практически во всех существующих работах по многокритериальной оптимизации этот вопрос оставляется авторами без внимания. Сразу же после выполнения тем или иным способом нормализации частных критериев они считаются аддитивными.

Методы, основанные на выведении в ограничениях всех "лишних" частных критериев, сводят задачу к однокритериальной и не требуют дополнительных комментариев. Подход же, связанный с установлением предпочтения на частных критериях, представлен методами решения лексикографических задач. Эти методы иногда называют аксиоматическими, поскольку они предусматривают установление предпочтения с помощью некоторой системы аксиом.

Основополагающим понятием этой группы методов является понятие лексикографического отношения предпочтения, формулирующееся следующим образом [273].

Стратегия  $x$  предпочтительнее стратегии  $y$  (под стратегией понимается любое целенаправленное действие), т. е.  $x \succ y$ , если выполняется одно из условий:

$$g_1(x) > g_1(y);$$

$$g_1(x) = g_1(y), \quad g_2(x) > g_2(y);$$

$$g_1(x) = g_1(y), \quad i = [1, p-1], \quad g_p(x) > g_p(y), \quad p \in \{K\},$$

где  $g_i$  — частные критерии системы,  $i \in \{J\}$ .

В настоящее время разработан ряд методов решения лексикографических задач: "жесткого приоритета", "последовательных уступок", ранжирования критериев, "решающих правил" и т. п. Рассмотрим некоторые из них.

**Метод "жесткого приоритета".** В соответствии с этим методом частные критерии располагают в ряд предпочтения в соответствии с их важностью. Оптимизацию производят последовательно, начиная с наиболее важного критерия, например  $g_1(x)$ , оптимизируемого на исходном множестве  $\{X^0\}$ . Второй по важности критерий оптимизируют уже на подмножестве, на кото-

ром  $g_1(x)$  сохраняет свое оптимальное значение. Оптимизацию последующих критериев выполняют аналогичным образом.

Из выражения (15.6) для точек области Парето, представляющей область существования компромиссных решений, видно, что внутри области Парето такая процедура выбора оптимального решения принципиально неосуществима, так как оптимизация по первому критерию дает единственный оптимальный вектор  $\hat{x}$ . Оптимизация последующих критериев становится невозможной, поэтому метод "жесткого приоритета" неприменим к задаче проектирования.

**Метод "последовательных уступок".** Этот метод, названный в честь метода "жесткого приоритета", получил наибольшее распространение среди аксиоматических методов.

Процедура решения многокритериальной задачи методом "последовательных уступок" заключается в том, что все частные критерии располагают и нумеруют в порядке их относительной важности, определяемой на основании оценок экспертов; оптимизируют первый, наиболее важный критерий; затем из некоторых соображений назначают величину допустимого отклонения значения этого критерия и оптимизируют второй по важности частный критерий при условии, что значение первого критерия не должно отличаться от оптимального более, чем на величину установленного отклонения-уступки; далее подобным же образом поочередно используют все остальные частные критерии. Оптимальным считается любое значение вектора  $\hat{x}$ , полученное при решении задачи отыскания условного оптимума последнего по важности критерия.

Аксиоматические методы, так же как и все другие эвристические методы, для раскрытия неопределенности системы используют информацию, поступающую от лица (лица), принимающего промежуточные решения, и тем самым приносят полную бездоказательность в содержание этих методов. Так, в методе "последовательных уступок" лица, принимающего решение, привлекается по крайней мере, дважды: первый раз при ранжировании частных критериев, второй — при установлении величины "уступок". Легко видеть, что если выделение области Парето обеспечено, то наличие "уступок" является не более чем разрешением ком-



промисла. Поскольку при этом по-прежнему для решения задачи привлекается субъективная информация, существенного различия между аксиоматическими и другими эвристическими методами не существует.

В завершение изложения основных идей эвристических методов можно привести яркое высказывание Е. С. Венциеля. Характеризуя эвристический подход к решению компромиссной задачи, Е.С. Венциель отмечает: "Здесь мы встречаемся с чрезвычайно типичным для подобных ситуаций приемом — переносом произвола из одной инстанции в другую". Действительно, простой выбор компромиссного решения кажется слишком произвольным, недостаточно "научным". А вот манипулирование с формулой, включившей пусть столь же произвольно названные коэффициенты, сообщает решению черты какой-то "научности". По существу же, никакой науки здесь нет — одно перебивание из пустого в порожнее" /57/.

Принципиально открыта возможность формализации процедуры выбора компромиссного решения внутри области Парето, при постановке рассмотренных методов их авторы в недавнем виде вводят утверждение об отсутствии в самой системе объективной информации, необходимой для принятия компромиссного решения. В дальнейшем, при рассмотрении формальных методов, представляющих другую группу методов решения многокритериальной задачи оптимизации, мы убедимся, что это не так. Вместе с тем, нельзя сказать, что формальные методы позволяют определять оптимальные ГТХ корабля объективно в полном смысле этого слова, так как при формулировании простейшей схемы корабля, описании условий внешней среды, формировании граничных и начальных условий задачи неизменно присутствует субъективное начало так же, как это происходит и при решении любой другой естественнонаучной задачи. Смысл применения формальных методов заключается в исключении субъективного подхода на последнем этапе решения задачи — этапе реализации процедуры оптимизации ГТХ на основе анализа функционирования ММК и сосредоточении всех неформальных (субъективных, эвристических) процедур на начальном этапе проектирования при постановке задачи. При этом предполагается

обеспечить в интересах принятия компромиссного решения выделение возможно большей информации, объективно содержащейся в самой системе.

Указание на то, что привлечение формальных методов позволяет исключить использование эвристических процедур на этапе, следующем после применения ММК, определяет и то место, которое могли бы занимать эвристические методы принятия решения в процессе итерационного проектирования. Наибольшую эффективность от применения этих методов следует ожидать там, где отсутствует возможность построения достаточно удовлетворительной ММК.

В связи с изложенным общая схема решения многокритериальной задачи оптимизации с помощью формальных методов предполагает применение полностью формализованной процедуры раскрытия неопределенности системы. Направление теории многокритериальной оптимизации, связанное с разработкой формальных методов, стало развиваться лишь в последние годы, однако темпы его развития и полученные результаты позволяют надеяться на то, что в скором времени это направление получит самостоятельную теоретическую базу, объединяемую под общим названием "теория компромиссных решений".

Как это отмечалось выше, основным отличием формальных методов от эвристических является то, что проектные решения, принимаемые в результате использования этих методов, более объективны. Это достигается за счет специфических особенностей задачи проектирования военно-технических систем. Дело в том, что существует реальная возможность нормирования частных критериев подсистем за счет информации, заключенной лишь в самой ММК. Попытками формализовать эту информацию и обуславливается появление формальных методов. Таким образом, общая схема решения многокритериальной задачи оптимизации с помощью формальных методов предполагает применение полностью формализованной процедуры раскрытия неопределенности системы.

В п. 15.1 при раскрытии аспектов многокритериальной задачи оптимизации затрагивался вопрос о возможности постановки многокритериальной задачи при условии существования гло-

большого критерия. Такую задачу мы назвали несобственной многокритериальной задачей оптимизации в связи с присутствием в задаче в явном виде глобального критерия, указывающего на однокритериальный характер ее постановки. Вместе с тем, структура математической модели системы сложная, что обеспечивает существование множества критериев и позволяет говорить о многокритериальном аспекте. Конечно, такое выделение задачи условно, однако нельзя не отметить, что при наличии глобального критерия возможности получения компромиссных решений между частными критериями значительно ограничены.

Первые два метода, которые будут рассмотрены ниже, приводятся в качестве иллюстрации решения многокритериальной задачи в несобственной постановке. В первом случае указанный путь реализуется за счет организации системы штрафующих или поощряющих воздействий на частные критерии подсистемы. При этом подходе предполагается, что благодаря стимулирующим воздействиям точки локальных оптимумов будут двигаться от своих собственных значений таким образом, что качество функционирования системы в целом будет повышаться.

**Метод согласованной оптимизации подсистем судна.** Метод был разработан В. М. Пашиным и изложен в работах [267, 268].

В качестве основного структурного представления системы в методе предусматривается разделение системы на уровни: верхний и нижний уровни процесса разработки проекта судна. При этом нижний уровень системы в свою очередь разбивается на ряд подсистем (интегрированных). На первом, или верхнем уровне определяются оптимальные элементы исходя из максимума эффективности судна и необходимости обеспечения его надлежащим качеством как плавучего инженерного сооружения. В общем виде задача оптимизации элемента верхнего уровня записывается следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} G(\hat{x}, \bar{x}_k) &\leq G(x, \bar{x}_k), \\ f_j(x, \bar{x}_k) &= b_j, \forall x \in \{S_1\}, \\ f_k(x, \bar{x}_k) &\geq b_k, \forall x \in \{S_2\}, \\ \hat{x}, x &\in \{X\}. \end{aligned} \right\} \quad (15.52)$$

где  $\{S_1\}$ ,  $\{S_2\}$  — подмножества ограничений, выполняемых в виде строгих равенств и неравенств ( $\{S_1\} \cup \{S_2\} = \{S\}$ );  $\bar{x}_k$  — независимые переменные  $k$ -х подсистем, рассматриваемые в (15.52) как постоянные;  $x$  — независимые переменные верхнего уровня;  $\hat{x}$  — решение задачи.

Предполагается, что в качестве критерия  $G(x, \bar{x}_k)$  выступают приведенные затраты, отнесенные к объему выполняемой судном работы.

Соответственно для каждой подсистемы судна формулируются задачи типа:

$$\left. \begin{aligned} g_k(\hat{x}, \hat{x}_k) &\leq g_k(x, x_k), \\ f_a(\hat{x}, x_k) &\geq b_a, \quad \forall x \in \{S_k\}, \quad k \in \{K\}, \\ x_k, \hat{x}_k &\in \{X_k\}. \end{aligned} \right\} \quad (15.53)$$

где  $g_k(\hat{x}, x_k)$  — частный критерий  $k$ -й подсистемы.

Каждую задачу (15.53) необходимо решать при фиксированных значениях  $\hat{x}$  из (15.52). Задачи нижнего уровня проектирования должны давать согласованные и непротиворечивые решения по отношению к задаче (15.52). Непротиворечивость понимается в том отношении, что оптимальные в  $k$ -задачах векторы  $\hat{x}_k$  улучшают глобальный критерий  $G$ , т. е. повышают эффективность судна. Что касается согласованности, то задачи называются согласованными, если технические решения, принимаемые на нижнем уровне, стимулируют такое изменение положения границ в задаче верхнего уровня, которое обеспечивает при следующей за ними корректировке элементов судна повышение его эффективности.

С учетом выдвинутых требований существо предлагаемого метода построения частных критериев заключается в том, что каждый такой критерий строится как сумма приведенных затрат по  $k$ -й подсистеме и приращений глобального критерия, вызываемых изменением границ допустимой области в задаче (15.52) при выборе тех или иных решений в данной подсистеме. Ориентировка на приведенные затраты по подсистеме будет стимулировать принятие решений, улучшающих эффективность судна. Вторая составляющая критерия предназначена для координации принятия решений при проектировании подсистем с позиций верхнего уровня проектирования, обеспечивающего выполнение требований к судну. Расчет этой составляющей предлагается производить с использованием соотношений теории двойственности в математическом программировании и теоремы о возмущении оптимума, позволяющих предсказывать приращение критерия при изменении границ допустимой области. Для этой цели используются оценки оптимального решения задачи верхнего уровня, представляющие в содержательном смысле скорость изменения критерия по лимитирующим ограничениям этой задачи и по форме являющиеся значениями переменных задачи двойственной по отношению к исходной. Непосредственно из этого следует общая форма предлагаемых частных критериев для выбора оптимальных значений переменных  $x_k$  подсистем при условии, что оптимальные элементы судна определены и равны  $\bar{x}$ :

$$K_k(x_k) = G_k(x_k) + m \left[ \sum_{i \in (S_1^*)} \beta_i \Delta f_i(x_k, \bar{x}_i) - \sum_{i \in (S_2^*)} \beta_i \Delta f_i(x_k, \bar{x}_i) \right] + m \sum_{i \in (I^*)} (\partial G(\bar{x}, \bar{x}_i) / \partial x_i) \Delta x_i(x_k, \bar{x}_i), \quad (15.54)$$

где  $G_k(x_k) = g_k(\bar{x}, x_k)$  — частный критерий, подлежащий минимизации;  $G_k(x_k) = G_k(\bar{x}, x_k)$  — абсолютные приведенные затраты по  $k$ -й подсистеме;  $m$  — коэффициент перевода от удельных приведенных затрат к абсолютным (для грузовых судов — годовая провозная способность);  $\beta_i$  — значения двойственных переменных (множителей Лагранжа), получаемые из задачи верхнего

уровня (15.52) (представляя собой скорость изменения глобального критерия по ограничениям, они измеряются в единицах этого критерия);  $\Delta f_i(x_k, \bar{x}_i) = f_i(\bar{x}, x_k) - f_i(\bar{x}, \bar{x}_i)$  — приращение  $i$ -ограничения, вызванное принятием при проектировании данной подсистемы величины  $x_k$ , отличной от  $\bar{x}_i$  в задаче верхнего уровня;  $(S_1^*)$  — множество ограничений типа  $(S_2^*)$ , выполненных в задаче верхнего уровня в виде строгих равенств, т. е. множество лимитирующих ограничений;  $(I^*)$  — соответствующее подмножество общего множества элементов судна  $(J)$ ;  $\partial G(\bar{x}, \bar{x}_i) / \partial x_i$  — производная глобального критерия в (15.52) по размерениям судна;  $\Delta x_i(x_k, \bar{x}_i) = x_i(\bar{x}, x_k) - x_i(\bar{x}, \bar{x}_i)$  — прямое приращение размерений, необходимость в котором возникает непосредственно при проектировании данной подсистемы (например, увеличение длины машинного отделения по сравнению с принятой при определении оптимальных элементов судна в задаче верхнего уровня).

Основным заложением в метод принятим, позволяющим производить согласованную оптимизацию подсистем, является принцип координации, который заключается в следующем. Предположим, при решении задачи верхнего уровня в качестве лимитирующего оказалось ограничение  $i = x'$ , отражающее требование к вместимости грузовых помещений. Тогда в каждой подсистеме выбор  $x_k$ , приводящий к положительным  $\Delta f_i(x_k, \bar{x}_i)$ , будет уменьшать частный критерий, т. е. увеличение грузоемкости поощряется. Отрицательное  $\Delta f_i(x_k, \bar{x}_i)$ , — уменьшение грузоемкости — соответственно увеличивает критерий, т. е. принимаемые  $x_k$  штрафуются. Поощрение и штраф равны истинному приращению глобального критерия, вызываемому именно этим изменением грузоемкости. Размер штрафа или поощрения еще не дает возможности окончательно судить об оптимальности того или иного  $x_k$ . Для этого необходимо учесть собственные приведенные затраты по данной подсистеме, также зависящие от  $x_k$ , т. е. окончательную оценку позволяет получить частный критерий (15.54). В этом случае можно сказать, что

оценки  $\hat{J}$ , представляют управляющие параметры, через которые реализуется избранный принцип координации оптимизационных задач разных уровней проектирования. С этой точки зрения задача верхнего уровня (15.52) может быть названа управляющей, при которой величины  $\hat{J}$ , рассматриваются как оценки ограничений задачи и номарируются в единицах глобального критерия.

Метод согласованной оптимизации подсистем судна наглядно демонстрирует возможность получения формального компромиссного решения при нескольких частных критериях. Существование этого метода также показывает возможность получения дополнительной объективной информации из системы для определения меры компромисса между ее подсистемами. Метод принципиально отличается от формальных методов решения многокритериальной задачи оптимизации в собственной постановке и имеет самостоятельное значение.

**Метод ветвей и границ.** Первоначально метод ветвей и границ успешно использовался для решения дискретных задач математического программирования. При этом, основным правилом отсева бесперспективных вариантов был принцип, идеологически родственной критерию оптимальности динамического программирования [17]. Впоследствии этот подход стал применяться в задачах исследовательской оптимизации [231, 232, 233] и многокритериальных задачах [123, 198]. Идея метода ветвей заключается в постулировании некоторого априорного принципа  $R$  [123] разбиения множества альтернатив  $\{X\}$  на интересующие множества. При этом исходному множеству альтернатив ставится в соответствие корневая вершина  $\alpha$ , некоторого дерева (дерева перебора). Эту вершину называют вершиной нулевого уровня.

Все вершины следующего, первого уровня соответствуют различным подмножествам  $\{X\}$ , получаемым в результате использования принципа разбиения  $R$ . Обозначая эти подмножества через  $\{X_i^1\}$ ,  $i = [1, n_1]$  имеем

$$\{X\} \cap \{X_i^1\} \neq \emptyset, \bigcup_{i=1}^{n_1} \{X_i^1\} = \{X\}, \{X_i^1\} \in R(X).$$

Применив принцип разбиения  $R$  к вершине  $\alpha$  уровня  $k$ , которая соответствует подмножеству  $\{X_i^k\}$ ,  $i = [1, n_k]$ , получим вершину  $\{X_i^{k+1}\}$ , лежащие на уровне  $k+1$ .

Вершина раскрывается, если в данном подмножестве содержится несколько альтернатив. В результате этой процедуры получается конечное дерево, висящие вершины которого соответствуют содержащимся в  $\{X\}$  альтернативам.

Получающееся таким образом множество вершин дерева перебора определяет необходимое число шагов для принятия решения, которое может оказаться значительным. С целью сокращения числа перебора висящих вершин задается алгоритм, работающий в соответствии с некоторым правилом  $\mu$  выбора частной вершины, подлежащей развитию на каждом шаге. Это правило направлено на отсеивание решений, которые не могут быть построены до оптимальных [234]. Формализация правила  $\mu$  получила название "оценочной" функции [123], а гарантированной оценочной функцией называется такая оценочная функция, которая гарантирует нахождение оптимальной альтернативы, несмотря на то, что некоторые вершины при этом раскрываться не будут. Раскрытие вершин предполагается вести по признаку максимума гарантированной оценочной функции. Выбор правила развития вариантов и правил отсеивания некоординированных вариантов определяется специфической решаемой задачей.

Применительно к многокритериальной задаче оптимизации метод ветвей обладает актуальностью лишь в случае выделения из всех возможных альтернатив парето-оптимальных. При этом предполагается, что перспективную вершину можно выбирать либо с помощью оценочной функции, либо с привлечением ЛПР [123]. Все вопросы, связанные с использованием эвристических методов уже рассматривались в предыдущем параграфе, что же касается использования оценочной функции, то очевидно, что эта идея полностью совпадает с неограниченной постановкой многокритериальной задачи оптимизации при условии, что

каждой вершине дерева перебора ставится в соответствие некоторое множество частных критериев. Наибольшее развитие этот подход получил в результате совместного применения метода ветвей и так называемого метода границ.

Достаточно подробно этот метод изложен в работе [234]. Основная его идея заключается в предположении, что на область существования частных критериев задачи наложена достаточно жесткая система ограничений вида

$$\alpha_j g_j(x) \leq A, \quad \forall j \in \{J\}. \quad (15.55)$$

Таким образом, речь идет не столько о поиске компромиссного решения среди парето-оптимальных вариантов, сколько об удовлетворении системе ограничений при заданном предпочтении на области компромиссов. При этом считается, что если система ограничений совместна и ее область решений частично или полностью совпадает с областью Парето, то единственную компромиссную альтернативу можно получить, оптимизируя на этой области какой-либо обобщенный критерий. В качестве такого критерия в работе [234] рассматривается критерий вида

$$G(x) = \sum_{j \in J} \alpha_j g_j(x), \quad (15.56)$$

где  $\alpha_j$  — числовые коэффициенты, характеризующие априорно заданное предпочтение на множестве частных критериев  $g_j(x)$ .

Существуют и другие версии метода ограничений [20].

В любом случае, если заданная система ограничений не обеспечивает единственность решения задачи выбора, для получения такого решения всемерно предлагается привлечение информации о предпочтении на оставшихся для выбора множестве допустимых альтернатив в виде целевой функции вершины дерева перебора более высокого уровня. Не рассматривая сужение области допустимых решений задачи за счет действия априорно наложенных ограничений, основную методологическую канву многокритериальной интерпретации метода ветвей и границ можно изложить следующим образом.

При раскрытии каждой вершины  $(k-1)$  уровня рассматривается многокритериальная задача оптимизации на множестве

частных критериев, отвечающих множеству высших вершин  $k$ -го уровня. На множестве всех решений этой задачи выделяется множество парето-оптимальных решений  $(X_k^*)$ . Для получения единственного компромиссного решения в задачу вводится некоторая целевая функция  $(k-1)$ -го уровня  $G_{k-1}(x)$ , по признаку экстремального значения которой и производится выбор, т. е.

$$G_{k-1}(\hat{x}) \leq G_{k-1}(x), \quad \text{для } \hat{x} \in (X_k^*) \text{ и } \forall x \in (X_k^*). \quad (15.57)$$

То обстоятельство, что решение на  $(k-1)$ -м уровне ищется на области  $(X_k^*)$ , является формализацией принципов координируемости и согласованности, подробно раскрытых при изложении метода согласованной оптимизации подсистем судна [288]. С целью сокращения числа шагов просмотра конкурентоспособных вершин вводится гарантированная оценочная функция, которая представляет собой целевую функцию корневой вершины дерева перебора, так как должна обеспечивать введение единой меры на все семейство рассматриваемых конкурентоспособных вершин.

Из изложенного ясно видна методологическая общность метода ветвей и границ и собственной постановки многокритериальной задачи оптимизации. При отказе от предположения о возможности получения лучшей информации по отдаче предпочтения тому или иному парето-оптимальному варианту нижнего уровня структуры, задача автоматически переходит в собственную постановку многокритериальной задачи оптимизации. В последнее время появляется все больше работ, развивающих изложенный выше подход применительно к задачам проектирования сложных инженерных систем [192], однако как было уже показано, существует целый класс важных практических задач, адекватно представленных только в собственной постановке. Так же, как и в случае метода согласованной оптимизации подсистем судна, метод ветвей и границ принципиально несводен к этому классу задач.

15.4. ФОРМАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ  
МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫХ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ  
В СОБСТВЕННОЙ ПОСТАНОВКЕ. МЕТОД ПАРИТЕТА

Подход к решению многокритериальной задачи в собственной постановке подразумевает свертывание частных критериев в некоторую функцию (функционал), рассматриваемую в качестве целевой функции, относительно которой решается задача оптимизации. Проблема составления такой функции, т. е. свертки частных критериев, получила название проблемы скаляризации задачи векторной оптимизации.

Чтобы не составлять полный перечень возможных сверток, следует исключить из рассмотрения типы сверток и подходы к их формированию, не отвечающие условиям компромиссной задачи. Здесь имеются в виду свертки, построенные на так называемых принципах доминантности [375]. В соответствии с этим принципом в общем случае решение находится из условия:

$$\exists \bar{x}_i, \min g_j(\bar{x}_i) \leq g_j(\bar{x}), \quad (15.58)$$

$$\forall x \in \{X^f\} \text{ и } i \in \{J\}.$$

Возможна другая запись этого принципа:

$$G(x) = \min_i g_i(x). \quad (15.59)$$

На идее доминантности основывается целый ряд принципов выбора, такие как сам принцип доминантности (15.58), частичной доминантности, Слейтера, суммарной эффективности, доминирующего результата, равномерной оптимизации (гарантированного результата) (15.59) и многие другие, перечислить которые или разбирать формальные выражения, отражающие принятые принципы выбора, нет необходимости. Все эти принципы объединяет то, что они не удовлетворяют условиям компромиссной задачи из-за заложенных в эти подходы двух основных противоречий. Прежде всего такие свертки, как (15.58), не дают ничего нового по сравнению с методами, предусматривающими выделение всех, кроме какого-либо одного критерия, в ограничения или просто назначение "главного" частного критерия, относительно которого и решается задача оптимизации.

Иными словами, речь идет о сведении многокритериальной задачи оптимизации к однокритериальной.

Другим противоречием, присущим доминантным методам, является то, что все частные критерии считаются априорно сравнимыми (аддитивными), на чем и основывается идея доминантного выбора (15.59).

Рассматривая в [87] вопрос полноты системы элементарных действий над частными целевыми функциями при их сворачивании Ю. Б. Герштейн показал (теорема 1), что зависимость свертки от частных критериев может быть представлена в виде конечного числа действий типа линейных или мультипликативных преобразований. С этой точки зрения достаточно общими могут оказаться два распространенных типа сверток. Это аддитивная и мультипликативная свертки частных критериев.

Аддитивная (линейная) свертка. Иногда эту свертку называют принципом интегральной (средней) оптимизации. В общем виде она имеет следующий вид

$$G(x) = \sum_{i=1}^n g_i(x). \quad (15.60)$$

Представление свертки частных критериев в форме (15.60) возможно только в случае предположения об их аддитивности, т. е. способности к сложению. Это предположение безусловно аксиоматично [220]. Тем не менее, если предположить, что оно справедливо, то тогда однокритериальную задачу всегда можно представить как многокритериальную с любым числом частных критериев, и значит никакой проблемы многокритериальности просто не существует. Поскольку всякой аксиоматической аппарат должен отвечать условно непротиворечивости, свертку (15.60) нельзя считать допустимой.

Вместе с тем следует отметить, что аддитивная свертка удовлетворяет условиям выпуклости при выпуклости частных критериев, что обеспечивает решение единственности в возможном многократного сворачивания по неравной силе сверт. Кроме того, решение задачи оптимизации относительно  $G(x)$  принадлежит области Парето и, следовательно, отвечает условиям компромиссной задачи.

Мультипликативная свертка. Эту свертку чаще называют принципом справедливого компромисса или принципом выбора Нэша. Она может быть записана в виде:

$$G(x) = \prod_{i=1}^n g_i(x), \quad (15.61)$$

Обоснование (15.61) не так очевидно, как (15.60), однако, в отличие от последней мультипликативная свертка не требует введения аксиомы аддитивности, что позволяет избежать последнего противоречия. Не сразу становится ясным, в какой степени свертка (15.61) отвечает компромиссной задаче. Вместе с тем, для случая двух критериев существует некоторое логическое обоснование для выбора этой свертки. Условием нахождения решения задачи для этого случая является выражение:

$$\nabla G(x) = \nabla \prod_{i=1}^n g_i(x) = 0, \quad x \in (X^*)'$$

или

$$\begin{aligned} g_1(x) \nabla g_2(x) + g_2(x) \nabla g_1(x) &= 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow \nabla g_1(x) / g_1(x) &= -\nabla g_2(x) / g_2(x). \end{aligned} \quad (15.62)$$

Условие (15.62), выполняющееся в точке решения задачи  $\hat{x}$ , интуитивно отвечает идее равных относительных "потерь" как первой, так и второй подсистемами при смешении относительно  $\hat{x}$  в сторону второго или первого локального оптимума соответственно. Последнее рассуждение и позволило считать (15.61) принципом справедливого компромисса. Вместе с тем, недостаточная обоснованность введения мультипликативной свертки является неединственной проблемой, стоящей на пути ее применения. При этом подходе также существует противоречие, обусловленное тем обстоятельством, что мультипликативная свертка не сохраняет проективного смысла глобального критерия при свертывании частных критериев, отражающих проективный характер задач в элементах. Как уже отмечалось, многокритериальной задаче оптимизации отвечает сложная структура системы, в общем случае — многоуровневая иерархическая структура. Предположение о многоуровневости структуры основывается на од-

ном из самых фундаментальных понятий системного подхода — относительности понятия системы. Это означает, что любая система при изменении постановки задачи может рассматриваться как подсистема или элемент. Однако в этом случае глобальный критерий всякой системы может выступать в качестве частного критерия на более высоком уровне иерархии и, следовательно, должен сохранять смысл критерия, например, критерия типа "стоимость — эффективность", коль скоро система оценивается с позиций военно-экономического анализа. Несоблюдение этого требования, как это имеет место в случае мультипликативной свертки, во всяком случае исключает ее применение к системам с многоуровневой структурой.

После выполнения анализа свертки частных критериев, рассмотрим несколько наиболее характерных методов решения многокритериальной задачи оптимизации в собственной постановке.

#### *Принцип максимума функции неопределенности*

Одними из наиболее фундаментальных физических единиц, служащих для оценки состояния любой системы, являются энтропия и информация. Все происходящее в природе процессы так или иначе сводятся к различным преобразованиям энергии. Для нечетыривающего описания таких процессов используется как само понятие энергии, так и понятие энтропии, под которой принято понимать усредненную характеристику, описывающую равновесное состояние системы. Однако для описания состояния сложной системы необходимо введение дополнительной физической величины — информации, связывающей степень соответствия между состояниями элементов системы. Идея применения информационного описания к анализу функционирования некоторых специальных систем имеет значительную историю и развитие приложено в технике. Вместе с тем, информационная теория систем, предназначенная для реализации информационного подхода в общей теории систем, является развивающимся направлением, в котором наряду с принятыми методами имеется и ряд нерешенных проблем.

Существует несколько подходов к определению количества информации  $I(00)$ , однако в случае если речь идет о синтезе (проектировании) сложной технической системы, под количеством информации прежде всего подразумевается мера неопределенности в отношении предпочтения частным интересам того или иного элемента. Учитывая, что основные величины, которыми оперирует теория информации — энтропия и количество информации — по смыслу достаточно близки друг к другу и вопрос их различия не решен до конца, в дальнейшем в качестве меры неопределенности рассматривается так называемая функция неопределенности, обозначаемая  $H(X)$  и вычисляемая по выражению вида

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i, \quad (15.63)$$

где  $\{X\} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  — некоторое конечное множество событий, которые могут наступить с вероятностями  $p_1, p_2, \dots, p_n$  соответственно, причем множество вероятностей удовлетворяет основному условию нормировки

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1. \quad (15.64)$$

Указанное множество событий отождествляется с множеством состояний физической системы, в каждом из которых она может оказаться с определенной вероятностью.

Обоснование принципа максимума функции неопределенности в качестве верхней границы частных критериев при решении многокритериальной задачи оптимизации состоит в следующем. Выдвигается аксиоматический принцип, в соответствии с которым оптимальным считается такое состояние системы (при варьировании ТТХ корабля каждому сочетанию этих характеристик отвечает определенный вариант корабля, т. е. состояние системы), при котором проектиant имеет наименьшую определенность об отдаче предпочтения тому или другому элементу системы. Выдвинутый принцип объясняется необходимостью удовлетворения основному свойству функции неопределенности. В соответствии с этим свойством, если множество событий  $\{X\}$

из (15.63) содержит достоверное событие, то его функция неопределенности равна 0:

$$H(X) = 0. \quad (15.65)$$

Это вполне объяснимо — подобное множество не несет в себе никакой неопределенности.

Простейшей интерпретацией выражения (15.65) будет случай, относящийся к состоянию системы, находящейся в одной из точек локальных оптимумов. Иными словами, вопрос о том, какой из подсистем корабля отдаче предпочтения для варианта корабля с ТТХ, отвечающими точке оптимума одной из подсистем, не содержит в себе никакой неопределенности. Предпочтение отдаде той подсистеме, относительно оптимальной точки которой выбран ТТХ корабля.

Интуитивно ясно, что во всех других случаях, не соответствующих локальным оптимальным точкам, функция неопределенности принимает некоторые положительные значения и существует такое состояние системы, для которого значение этой функции наибольшее. Нетрудно показать  $I(00)$ , что при определенных условиях, отмечавших компромиссной задаче, функция неопределенности экстремальна и ее экстремумом является максимум.

Таким образом, принцип максимума функции неопределенности предполагает выполнение в точке оптимума системы условия

$$H(\hat{x}) = \max H(x) \quad (15.66)$$

или

$$H[g(\hat{x})] = \max H[g(x)], \quad x \in (X'), \quad (15.67)$$

$$l \in [L].$$

Впервые принцип максимума функции неопределенности был выдвинут в работе [356], но конкретные его приложения неизвестны.

#### **Принцип максимальной эффективности**

Ранее было показано, что ни изменение масштаба измерения частных критериев (масштабирование), ни приведение их к еди-



нищим одной размерности не являются достаточными условиями аддитивности. Вместе с тем, после решения вопроса соизмеримости частных критериев открываются самые оптимистические перспективы на общее решение многокритериальной задачи оптимизации. По этой причине вопросы, связанные с приведением частных критериев к соизмеримому виду, некоторые авторы выносят за пределы содержательной части разрабатываемых ими методов. Безусловно это ошибочная тенденция, поскольку именно проблема соизмеримости частных критериев составляет основное содержание многокритериальной оптимизации.

При рассмотрении ранее приведенных методов можно было видеть, что даже при наличии в некоторых из них существенной противоречивой, содержательная часть предлагаемых рассуждений представляет определенный интерес и имеет методологическую ценность. К одному из таких подходов относится метод, основанный на принципе максимальной эффективности. Метод описан в работе [375] и состоит в следующем.

Предполагается, что в области допустимых решений значения частных критериев принимают наибольшие и наименьшие значения так, что

$$\exists \text{ такие } x_0 \text{ и } x_1, \text{ что } g_i(x_0) = \inf g_i(x); \quad (15.68)$$

$$g_i(x_1) = \sup g_i(x), \quad x_0, x_1 \in \{X^i\}, \quad i \in \{I\}.$$

Для приведения частных критериев к соизмеримому виду в рассматриваемом методе считается достаточным воспользоваться естественной нормализацией, в соответствии с которой

$$\alpha_i(x) = (g_i(x) - g_i(x_0)) / (g_i(x_1) - g_i(x_0)), \quad (15.69)$$

где  $0 \leq \alpha_i(x) \leq 1$ , для  $\forall x \in \{X^i\}$ ,  $i \in \{I\}$ .

При фиксированном значении  $i$  величина  $\alpha_i(x)$  представляет собой степень достижения оптимума (максимума при положительных индикаторах  $g_i$ ) в точке  $x \in \{X^i\}$  по  $i$ -му компоненту многоцелевого показателя. Обозначим через  $\{X_\alpha\}$  множество вида

$$\{X_\alpha\} = \{x \in \{X^i\} : \alpha_i(x) \geq \alpha, \text{ для } \forall i \in \{I\}\}, \quad (15.70)$$

где  $\alpha$  — заданный величина,  $0 \leq \alpha \leq 1$ . Выбор некоторого уровня  $\alpha$  обеспечивает для элементов непустого множества  $\{X_\alpha\}$  степень достижения оптимума по каждому из компонентов многоцелевого показателя не меньше  $\alpha$ .

Принцип максимальной эффективности определяется как задача нахождения максимально возможного уровня  $\alpha^*$ , т. е. требуется найти решение  $\alpha$ -задачи вида

$$\alpha^* = \max\{\alpha | X_\alpha\} + \{A\}, \quad \alpha \in [0, 1]. \quad (15.71)$$

Элемент  $\hat{x} \in \{X^i\}$  называется оптимальным по принципу максимальной эффективности, если  $\hat{x} \in \{X_{\alpha^*}\}$ , т. е. выполнены условия

$$\alpha_i(\hat{x}) \geq \alpha^*, \text{ для } \forall i \in \{I\}.$$

Величина  $\alpha^*$  считается наилучшим возможным приближением к оптимальному по всем компонентам многоцелевого показателя одновременно (при этом предполагается, что приоритет на компонентах не задан).

Как уже отмечалось, введение принципа максимальной эффективности создает впечатление, что проблема сравнимости частных критериальных оценок уже решена. Однако очевидно, что это не так, поскольку в самом выражении (15.69), построенном для конкретного  $i$ -го частного критерия, отсутствует информация о других частных критериях и, следовательно, вопрос о приведении функции  $g_i(x)$  к сравнимому виду введением (15.69) не решается. Более того, если преобразование (15.69) позволило бы сравнивать частные критерии, т. е. рассматривать их как аддитивные величины, то наиболее естественным было бы использовать линейную свертку (15.60), поскольку при постановке задачи отсутствие приоритета было оговорено.

#### Принцип паритета

Рассмотрим существо метода решения многокритериальной задачи оптимизации, основанного на принципе паритета, применительно к системе, структура которой представлена в элементарно, замыкающихся на один элемент верхнего уровня.

Непосредственно сам механизм формирования правила выбора для простоты будет рассматриваться на примере системы только с двумя элементами одного уровня. Такие системы получили название бинарных. Результаты, полученные при исследовании такой модели, могут быть распространены на системы с конечным числом элементов, а также на многоуровневые иерархические системы.

Как уже указывалось в п. 15.1, отличительной особенностью собственной многокритериальной задачи оптимизации является принципиальная невозможность формализации единого глобального критерия системы. Действительно, если корабль предназначен для решения задачи противозушной обороны и противолодочной задачи, то формально записать цель создания корабля невозможно. Вместе с тем, лексикографически, т. е. неформально, сформулировать цель создания корабля не составляет труда. Корабль должен решать как первую, так и вторую задачи. Собственно, невозможность формализации глобальной цели обусловила выделение многокритериальных задач в отдельный класс. При этом, однако, не следует считать, что цели создания корабля не существует. Это противоречило бы только что приведенному неформальному выражению цели и основному положению системного подхода, в соответствии с которым все искусственные системы являются целенаправленными. Из относительности понятия системы следует единственность глобальной цели. Наконец, неформальность глобального критерия еще не означает, что нельзя построить формального выражения, условно обозначающего такой критерий. Не представляется возможным лишь разрешить это выражение относительно всех входящих в него переменных.

Задавшись целью записать такое выражение, необходимо выполнять все условия, обеспечивающие его непротиворечивость основным положением системного подхода и содержательность компромиссной задачи проектирования. Сформулируем эти условия последовательно.

Во-первых, исходя из основного положений системного подхода, следует предположить неаддитивность частных критериев. В соответствии с основным правилом декомпозиции каждому

элементу одного уровня ставится в соответствие цель его создания, отличная от целей других элементов. Необходимость оценки степени достижения тем или иным вариантом элемента поставленной частной цели приводит к понятию эффективности и ее количественной меры — показателю эффективности. Включение в частные критерии в любом виде показателей эффективности элементов применительно к различным частным целям обуславливает неаддитивность этих частных критериев, так как показатели эффективности, построенные применительно к различным процессам функционирования элементов по своей природе существенно неаддитивны. Предположение о неаддитивности частных критериев вытекает также из самой постановки многокритериальной задачи. В противном случае для выражения глобального критерия достаточно было бы применить аддитивную свертку, после чего задача сводится к однокритериальной с нарушением принципа неформальности глобального критерия.

Второе условие, определяющее вид задачи глобального критерия, диктуется требованием содержательности компромиссной задачи. Из ее определения следует, что все решения этой задачи должны принадлежать области Парето, а поверхность целевых функций быть выпуклыми. Следовательно, вид свертки частных критериев должен обеспечивать получение в качестве решений на этой свертке только точек области Парето. Вместе с тем, предполагая декомпозицию системы на конечное число уровней, необходимо обеспечить возможность многократного повторения операции свертывания при сохранении указанных свойств. Единственной комбинацией, позволяющей на основе частных строго выпуклых целевых функций получать строго выпуклую свертку этих функций, является линейная свертка вида (15.60).

Наконец, в задачах проектирования необходимо, чтобы при свертывании критерия снизу вверх с помощью сверток не происходила утрата физического смысла критерия. В противном случае рассматривать свертку частных критериев нижнего уровня как глобальный критерий — частный критерий подсистемы верхнего уровня, количественно отражающий качество функционирования подсистемы, не удастся.

Указанным условием, обусловленным требованиями системного подхода и содержательностью комплексной задачи проектирования, в полной мере отвечает только линейная свертка с неопределенными коэффициентами вида

$$G(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i g_i(x),$$

$$\text{для } \forall x \in \{X^*\}, \quad \alpha_i = [0, \infty], \quad (15.72)$$

где  $n$  — число частных критериев.

Действительно, поскольку значения неопределенных коэффициентов  $\alpha_i$ , в качестве которых выступают положительные константы, неизвестны, то выражение (15.72) относительно значений, принимаемых вектором  $\alpha$ , неразрешимо. Это обстоятельство позволяет сохранить предположение о неформализуемости глобального критерия. Представление глобального критерия в виде суммы приведенных частных критериев на неопределенные коэффициенты дает возможность реализовать условие независимости этих критериев (первое условие). При этом следует считать, что сами неопределенные коэффициенты выполняют функцию приведения частных критериев к аддитивному виду, чем и обуславливается применение линейной свертки.

Как уже отмечалось, решения, получаемые с помощью выражения (15.72) для строго выпуклых функций  $g_i(x)$ , принадлежат области Парето. При распространении задачи на многоуровневую иерархическую структуру сохранение выпуклости глобального критерия в виде (15.72) обеспечивает выделение областей Парето снизу вверх (второе условие).

Наконец, поскольку величины  $\alpha_i$  являются коэффициентами приведения частных критериев к одному размерному единичным измерения, то следует полагать, что глобальный критерий, получаемый из (15.72), сохраняет физический смысл критерия элемента верхнего уровня. В дальнейшем величины  $\alpha_i$  будем называть коэффициентами приведения.

В случае выбора выражения для глобального критерия в виде (15.72) задача оптимизации ГТХ корабля не может быть записана в соответствии с постановкой, изложенной в п. 15.1:

$$\left. \begin{aligned} G(\hat{x}) &\leq G(x), \\ G(x) &= \sum_{i=1}^n \alpha_i g_i(x), \end{aligned} \right\} \quad (15.73)$$

для  $\hat{x}$  и  $\forall x \in \{X^*\}, \quad \alpha_i = [0, \infty]$

где  $\hat{x}$  — точка оптимума системы, т. е. решение многокритериальной задачи оптимизации.

Число неизвестных в (15.73) равно  $(n + 1)$ , где  $l$  — размерность вектора  $x$ . Таким образом, система (15.73) в раз неопределена. Для ее разрешения относительно неизвестных необходимо составить еще  $l$  дополнительных условий (равенств). С проектной точки зрения такие дополнительные условия должны были бы формально выражать отношение проектанта к самому понятию многокритериальной оптимизации, т. е. формализовать представление об оптимальной системе. При этом, при решении задачи нас будет интересовать не сама глобальная целевая функция  $G(x)$ , а лишь точка оптимальности  $\hat{x}$ , тем более, что выражение для глобального критерия принципиально невозможно получить по определению задачи. Тогда в дальнейшем вместо  $G(x)$  будет использоваться функция  $\bar{G}(x)$ , находящаяся с функцией  $G(x)$  в соотношении:

$$\bar{G}(x) = G(x)/\alpha_i, \quad \text{для } x \in \{X^*\}. \quad (15.74)$$

При этом индекс при  $\alpha$  выбран произвольно.

С учетом (15.74) и того, что функция  $\bar{G}(x)$  предполагается выпуклой и непрерывно дифференцируемой, (15.73) запишется:

$$\left. \begin{aligned} \nabla \bar{G}(x) &= 0, \\ \bar{G}(x) &= \sum_{i=1}^n \alpha_{i-1} g_i(x), \quad \alpha_{i-1} = 1, \end{aligned} \right\} \quad (15.75)$$

для  $\forall x \in \{X^*\}, \quad \alpha_i = [0, \infty]$

Теперь для решения (15.75) необходимо найти  $(n - 1)$  дополнительных условий, позволяющее разрешить (15.75) относительно

но неизвестных  $\alpha_i$ ,  $x$ . С учетом этих условий и для  $n = 2$  (15.75) примет следующий вид

$$\left. \begin{aligned} \nabla \bar{G}(x) &= 0; \\ \bar{G}(x) &= \sum_{\alpha_i=0}^1 \alpha_{i-1} g_i(x), \quad \alpha_0 = 1; \\ f(x) &= f(g_1(x), g_2(x), \alpha), \\ \text{для } \forall x \in \{X^*\}, \quad \alpha &= [0, \infty] \end{aligned} \right\} \quad (15.76)$$

Определение точек локальных оптимумов элементов  $\hat{x}_1$  и  $\hat{x}_2$  не содержит трудностей и может быть реализовано любым из существующих методов нелинейного программирования в рамках однокритериальной задачи оптимизации. Очевидно, что условие  $f$  представляет собой отношение, определяющее некоторый порядок на множестве элементов  $g \in \{g\}$ . При этом принципом выбора в многокритериальной задаче будет являться такое формирование этого отношения порядка, которое определяет, в каком смысле понимается решение задачи многоцелевой оптимизации частных критериев  $g(x)$  на множестве  $\{X^*\}$ .

Разделим условно все причины, побуждающие проектанта к выбору отношения предпочтения в оптимальной системе, на две группы. При этом под причинами, вошедшими в первую группу, будем понимать такие, которые учитываются в ММК и определяют меру взаимовлияния его подсистем (например, объем решения боевых задач, вероятность возникновения необходимости решения этих задач кораблем за период его жизненного цикла и т. п.). Другая группа причин определится всеми факторами, влияющими на определение отношения между подсистемами, но не вошедшими в первую группу факторов. Тогда, если предположить, что причины второй группы (например, политические или другие, формализовать которые в ММК не удается) отсутствуют, то оснований для введения какого-либо предпочтения не существует, так как все соображения об отдаче предпочтения уже учтены в самой математической модели по определению.

Отсутствие каких-либо причин, определяющих отношение предпочтения между подсистемами корабля, позволяет говорить о необходимости выполнения для системы в точке оптимума  $\hat{x}$

принципа паритета. При этом, учитывая, что отношение эквивалентности предполагает прежде всего приведение частных критериев к сравнимым шкалам измерения (эту функцию выполняет величина  $\alpha$ ), условие  $f$  можно записать так:

$$g_i(\hat{x}) = \alpha g_i(\hat{x}) \quad (15.77)$$

Если факторы, обусловленные причинами второй группы, все-таки имеют место, их можно учесть в условии (15.77) путем введения соответствующих коэффициентов в виде:

$$\beta_i g_i(\hat{x}) = \beta_i \alpha g_i(\hat{x}) \quad (15.78)$$

Здесь, однако, следует заметить, что в отличие от эвристической свертки коэффициенты  $\beta_i$ , отвечающие интуитивному представлению проектанта о предпочтении, будут применяться к частным критериям, уже приведенным с помощью величины  $\alpha$  к сравнимому виду.

Представление об оптимальной системе, сформулированное в виде принципа паритета (15.77), нередко проявляется в виде таких частных случаев, как принцип равнозначности корабля, равной живучести, равной надежности и некоторых других, выполнение которых по общепринятым представлениям обязательно для оптимального проекта корабля.

Таким образом, в качестве отношения на  $\{g\}$  бинарной неравлической системы определяется отношение эквивалентности (принцип паритета). При этом система (15.76) с учетом (15.77) может быть записана в виде

$$\left. \begin{aligned} \nabla \bar{G}(x) &= 0, \\ \bar{G}(x) &= g_1(x) + \alpha g_2(x), \\ g_i(\hat{x}) &= \alpha g_i(\hat{x}), \\ \hat{x}, \forall x \in \{X^*\}, \quad \alpha &= [0, \infty] \end{aligned} \right\} \quad (15.79)$$

Поскольку выражение для функции  $\bar{G}$  аддитивно, коэффициент  $\alpha$  имеет размерность

$$[\alpha] = [g_1 / g_2] \quad (15.80)$$

Размерность глобальной целевой функции  $G$  из системы (15.79) определена быть не может.

Возвращаясь к началу обоснования принципа паритета, необходимо остановиться еще на одном обстоятельстве. Уже отмечалось, что формальные методы не являются в принципе альтернативными методами абсолютно объективными. В этом смысле принцип паритета вполне отвечает духу формального подхода. Вводимое выражение (15.77) служит лишь для отвлечения неформальных процедур, неизбежных при постановке любой естественнонаучной задачи, от совершенно объективного процесса "оживления" информации об особенностях функционирования системы, содержащейся в ММК.

Решение многокритериальной задачи оптимизации в виде системы (15.79) может быть получено любым из существующих численных методов нелинейного программирования. Для случая  $J = 2$  такое решение может быть иллюстрировано рис. 15.5. Из

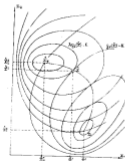


Рис. 15.5

рисунка видно, что точки локальных оптимумов подсистем относятся векторам  $\hat{x}_1 = (\hat{x}_1^1, \hat{x}_1^2)^T$ ;  $\hat{x}_2 = (\hat{x}_2^1, \hat{x}_2^2)^T$ . При этом, как было показано раньше, область Парето образуется точками касания линий равных значений частных целевых функций. В соответствии с основной идеей оптимизации элементы системы стремятся обеспечить решение задачи как можно ближе к собственным точкам локальных оптимумов. Механизм этого явления обуславливается особенностями функционирования математических моделей элементов, обеспечивающими существование точек локальных оптимумов, отличных друг от друга, и замыканием системы (при эшелонировании), определяющим возможность развития одного элемента системы только за счет другого ее элемента.

Введенный принцип паритета обеспечивает формальное разрешение конфликтной ситуации между элементами системы, т. е. формальное определение точки компромисса. Применительно к системе (15.79) компромиссная точка будет располагаться по линии, отвечающей области Парето, ближе к локальной оптимальной точке того элемента, частная целевая функция которого более "большенно" реагирует на удаление от точки оптимума. Если предположить, что модели элементов идентичны и отличаются только удельными эффективностями характеристиками (как это происходит при элементарной моделировке, см. п. 15.2), то предпочтение будет отдано элементу, обладающему большей удельной эффективностью.

Представление системы в виде двух элементов одного уровня является безусловно сильным упрощением. В [140] показано, что рассмотренный выше метод решения многокритериальной задачи оптимизации, основанный на принципе паритета, остается справедливым для иерархической системы произвольной структуры. Там же приводятся доказательства, определяющие условия существования и единственности решений, получаемых этим методом.

В работах [137] и [140] также показывается, что рассмотренные выше формальные методы: принцип выбора Нэша, принцип максимума функции неопределенности и принцип максималь-

ной эффективности, при определенных несущественных условиях сводятся к методу паритета.

### 1.5. ОСОБЕННОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ С ДИСКРЕТНЫМИ ВАРЬИРУЕМЫМИ ПЕРЕМЕННЫМИ

Задачи определения оптимальных тактико-технических характеристик корабля в настоящее время в основном решаются методами, в которых используются аналитические зависимости в виде уравнений, формул, неравенств и т. п. При этом считается, что переменные в решаемых задачах являются непрерывными величинами. Как только в математических моделях появляется необходимость использовать дискретные варьируемые переменные, представление моделируемой системы аналитическими зависимостями становится затруднительным, а в некоторых случаях вообще невозможно, так как нельзя в полной мере использовать аппарат дифференциального исчисления. Таким образом, существует необходимость в разработке таких подходов, которые позволяли бы решать задачи определения и оценки оптимального сочетания ТТХ проектируемого корабля при наличии дискретных варьируемых переменных, используя аппарат формальных методов.

С точки зрения процедуры выбора предпочтительного решения использование моделей синтеза даст исследователю значительное преимущество, заключающееся в теоретической связанности математической модели, за счет ее функциональной непрерывности. Это преимущество позволяет с помощью математической модели строить полное предельное альтернативы и вырабатывать информацию для работы механизма выбора. Однако в моделях, в которых наряду с непрерывными переменными присутствует хотя бы одна дискретная варьируемая переменная, возникают трудности по построению задач синтеза и их последующего использования в задачах анализа и оптимизации. Поэтому большое многообразие задач теории принятия решений может быть получено путем разделения предельных с точки зрения дискретности, которая возникает в моделях, содержащих дискретные варьируемые переменные.

Рассмотрим математические модели с точки зрения используемых в них варьируемых переменных.

В зависимости от того, в каком пространстве определена переменная, их можно разделить на непрерывные и дискретные.

Непрерывные величины могут быть только количественные. Для таких величин всегда можно использовать такую единичную меру, в целом числе которой и будет представлено наше измерение.

Дискретные величины в свою очередь подразделяются на количественные, порядковые и качественные.

Количественные — позволяют измерять степень проявления анализируемого свойства обследуемого объекта в определенной шкале.

Порядковые — позволяют упорядочивать объекты по степени проявления в них анализируемых свойств.

Качественные — позволяют разбивать обследуемые объекты на не поддающиеся упорядочиванию однородные по анализируемому свойству классы.

Таким образом, исходя из определения переменных, все существующие модели разделим на два класса (рис. 1.5.6):

- модели с непрерывными варьируемыми переменными или непрерывные модели;
- модели с дискретными варьируемыми переменными или дискретные модели.

Необходимо отметить, что непрерывная модель становится дискретной при появлении хотя бы одной дискретной варьируемой переменной.

Из всех дискретных моделей всегда можно выделить модели с несущественной дискретностью. В таких моделях используются количественные дискретные переменные, множество возможных значений которых достаточно велико (несколько десятков и более). Такие модели без каких-либо дополнительных ограничений можно считать непрерывными.

Влияние их на формирование предельных будет отличаться от действий непрерывных моделей лишь в том смысле, что предельными, образованными в результате работы моделей с не-

существенной дискретностью, всегда конечны и счетны. Этими свойствами непрерывные предельные не обладают.



Рис. 15а

Особое место в задачах выбора занимают модели, обладающие существенной дискретностью. В отличие от первого случая, отклик таких моделей уже не могут интерпретироваться как непрерывные величины. Эти модели формируют наиболее распространенный вид представляющей, то есть таких, которые определяются как конечное число альтернатив. Однако это совсем не обязательно. Выбор может быть произведен и на предельном, состоящем всего из одного элемента, то есть он может быть или выбран, или не выбран. Принципиально здесь изменения уже механики выбора — он перестает носить сравнительный характер.

Модели с существенной дискретностью разделим на два класса:

- модели с устраненной существенной дискретностью;
- модели с неустраненной существенной дискретностью.

Введение понятия устраненной дискретности связано с тем, что в случае рассмотренных моделей с количественными перемен-

ными, эту ситуацию удастся континуализировать (сделать модель непрерывной), путем замены случайных дискретных переменных величин их математическими ожиданиями. Так, например, при варьировании количества самолетов на корабле или количества зонитных управляемых ракет возникает ситуация, когда изменение на единицу их количества в начальных условиях приводит в процессе оптимизации к возникновению существенных разрывов целевой функции, что нарушает процесс оптимизации. В таких случаях дискретные значения переменных заменяются их математическими ожиданиями, обладающими необходимыми свойствами непрерывности.

Наибольшую сложность представляют модели с неустраненной существенной дискретностью, из-за наличия в них качественных переменных. В результате перехода таких переменных от одного значения к другому меняется модельная функция, и область допустимых решений ( $X'$ ) становится невыпуклой и невязкой. Если в решении непрерывных задач математического программирования достигнуты значительные успехи, то решение дискретных задач такого типа наталкивается на ряд существенных и специфических затруднений. Эти затруднения носят не только технический, но и принципиальный характер. Дело в том, что невыпуклость и невязкость области допустимых решений дискретной задачи делают невозможным применение известных приемов непрерывного математического программирования: продвижение из одной вершины многогранника в другую, перемещение по градиенту в окрестности данной точки и т. п.

Все сказанное показывает, что для решения дискретных задач оптимизации при наличии качественных переменных необходимы особые методы. Поэтому в данном параграфе и рассматривается метод, который позволяет применить для решения задач с неустраненной существенной дискретностью аппарат формальных методов, используя континуализацию модели. При этом в качестве методологического приема континуализации применяется "погружение" дискретной задачи в пространство непрерывных переменных.

Рассмотрим прием "погружения" дискретной задачи в пространство непрерывных переменных.

В общем случае каждому значению качественной дискретной переменной в математической модели корабля соответствует некоторый набор количественных характеристик, которые могут быть представлены непрерывными переменными. Например, пусть в задаче оптимизации ТТХ рассматривается корабль, предназначенный для выполнения одной боевой задачи (например, противовоздушной обороны), в которой дискретной варьируемой переменной является тип энергетической установки. Данная переменная относится, согласно принятой классификации, к качественной переменной и может принимать, в этом примере, два значения — на корабле может быть установлена газотурбинная (ГТУ) или дизельная энергетическая установка (ДЭУ). Эффективность выполнения одной задачи кораблем с разным типом главной энергетической установки при прочих равных условиях, оценивается с помощью одного и того же критерия. Данный тип задач относится к классу однокритериальных с дискретными переменными. Решение этих задач обычно осуществляется методом сравнительной оценки вариантов, одним из которых является корабль с ГТУ, а другим — с ДЭУ. Путем сравнения этих вариантов с помощью критерия оптимальности происходит выбор предпочтительного типа энергетической установки корабля.

Примеры континуализации задач описанного выше типа решаются следующим образом. Каждый тип ГЭУ (значения качественной переменной) в зависимости от своих технических особенностей и физических принципов описывается своей модельной функцией, но при этом используются непрерывные характеристики, такие как мощность энергетической установки, удельная масса, часовой расход топлива на выхлоп и т. п. Поскольку причиной невозможности устранения дискретных переменных являются качественные изменения, то есть изменения модельных функций (тип ГЭУ, применение смешанной энергетической установки невозможно), а качественная информация о системе содержится в ее структуре или морфологическом описании, то корабль рассматривается как система сложной структуры, каждый элемент которой отвечает новому значению качественной переменной, для которой вводится собственный частный

критерий, но зависящий уже только от непрерывных характеристик, входящих в качественную переменную. Таким образом, в результате реализации описанного выше приема мы произвели "погружение" дискретной задачи в пространство непрерывных переменных. Данный тип задач уже относится к классу многокритериальных с непрерывными переменными, для решения которых существуют специальные методы [13]. В частности, используя метод паритета [13], можно получить решение такой задачи на непрерывном поле переменных относительно частных критериев  $g_1(x)$  и  $g_2(x)$ . Отличительной особенностью многокритериальной задачи является то, что частные критерии, отвечающие элементам сложной структуры, не сравнимы между собой. В задаче же сравнительной оценки вариантов значения критерия оптимальности, вычисленные для каждого варианта корабля, конечно, сравнимы. Таким образом, переход от однокритериальной в многокритериальную задачу путем искусственного создания сложной структуры математической модели, мы получаем противоречие. Полученное противоречие объясняется тем, что варианты корабля, которые принадлежат области Парето, получаемые в результате свертки частных критериев вида

$$G(x) = g_1(x) + \alpha g_2(x), \quad \alpha \in [0, \infty] \quad (15.81)$$

не имеют физического смысла, то есть область Парето является "мишмой".

Для разрешения этого противоречия оказывается достаточным сохранение отношения на критериальных оценках, полученных сравнительной оценкой вариантов, при переходе к решению на сложной структуре.

В работе [31] определены необходимые и достаточные условия совпадения с точностью до альтернативных решений, полученных на дискретных и непрерывных моделях, и показывается, что в одной и той же модельной ситуации альтернативы, предпочтительные в рамках задачи сравнительной оценки вариантов, сохраняют это предпочтение и при переходе к решениям на сложной структуре, обеспечивающим континуализацию задачи в рамках данного метода.



Таким образом, условие нахождения предпочтительного варианта при решении многокритериальной задачи оптимизации дискретными переменными формулируется следующим образом. Если в точке глобального оптимума  $\hat{x}$  выполняется условие

$$g_1(\hat{x}) < g_2(\hat{x}), \quad (15.82)$$

то есть в точке глобального экстремума первый вариант является предпочтительнее второго, то одновременно между значениями частных критериев, вычисленных в точках соответствующих локальных оптимумов, выполняется другое условие:

$$g_1(\hat{x}_1) < g_2(\hat{x}_2), \quad (15.83)$$

то есть первый вариант является предпочтительнее и по соотношению значений частных критериев в точках собственных локальных оптимумов.

Данный метод при решении практических задач на стадии исследовательского проектирования корабля при наличии в математических моделях дискретных варьируемых переменных имеет следующие преимущества по сравнению с методом сравнительной оценки вариантов.

1. В ряде характерных случаев применение данного метода позволяет сократить число просматриваемых вариантов. Если решение задачи может быть организовано на одном поле переменных для всех альтернативных вариантов, то время вычисления оптимальной точки может быть сокращено за счет однократности использования поисковых процедур. При решении задач методом сравнительной оценки вариантов поисковые процедуры должны использоваться столько раз, сколько значений принимают дискретные переменные.

2. Применение метода к решению многокритериальных задач оптимизации позволяет использовать формальные методы для решения многокритериальной задачи оптимизации с дискретными переменными.

3. Поскольку получаемый результат позволяет осветить решение дискретной задачи к испривной, создается возможность использования аппарата дифференциального исчисления, в

частности, свойств первых и вторых производных целевых функций. Это позволяет получать в процессе исследования новую проекцию информации о состоянии модели, тенденциях движения на свойства корабля принимаемых конструкторских решений.

## Глава 16. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ИГР И ОБОСНОВАНИЕ РЕШЕНИЙ В РАЗВИВАЮЩИХСЯ СИСТЕМАХ

### 16.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ИГР

Теорией игр называется раздел математики, предметом которого является изучение математических моделей принятия решений в условиях конфликта. При этом под конфликтом понимается всякое явление, в котором участвуют различные стороны, называемые игроками и наделенные несовпадающими интересами. Как содержательная природа, так и структура конфликта, охватываемая теоретико-игровыми рассмотрениями, весьма разнообразны. К конфликтам в этом понимании слова относятся многие явления экономического, социального, правового, военного и т. д. содержания, а также спортивные состязания. В условиях конфликта стремление противника скрыть свои предостережения порождает неопределенность. Наоборот, неопределенность при принятии решения можно интерпретировать как конфликт принимающего решения субъекта с природой или с другим субъектом. Поэтому теория игр может также рассматриваться как теория принятия решений в условиях неопределенности.

Отдельные математические соображения по поводу конфликтов высказывались начиная с XVIII века многими учеными. Систематически теория игр была разработана Дж. Нейманом и О. Моргенштерном (1944 г.) как средство математического подхода к явлениям конкурентной экономики. Исходными понятиями каждого из разделов теории игр являются различные варианты понятий игры как формальной представляемой о конфликте и соответствующие им варианты понятия оптимальности. Формулировка принципов оптимальности может осу-

составляться на основе интуитивных представлений о целесообразном, формализуемых в рамках аксиоматического подхода. Точное описание конфликта в виде игры состоит в указании того, кто и как участвует в конфликте, каковы его возможные исходы, а также, кто и в какой форме заинтересован в этих исходах.

В современной теории игр базовым классом игр считаются так называемые бескоалиционные игры с выигрышами. Каждая такая игра описывается такими понятиями, как множество игроков, множество стратегий игроков, под которыми понимаются альтернативы способов действий игрока, и множество функций выигрыша, т. е. таких, каждое значение которых отвечает величине выигрыша или проигрыша игрока.

Класс бескоалиционных игр служит основой математически интересных и практически важных обобщений. Прежде всего, можно допустить, что игроки выбирают свои стратегии не независимо друг от друга, а возможно объединяются некоторые игроки в коалиции, в которых они могут выбирать свои стратегии согласованно. Такие игры получают название коалиционных. Отказ от условия конечности множества игроков приводит к понятию игры с бесконечным множеством игроков. Такие игры могут служить математическими моделями массового поведения. Обобщение в другом направлении получается, если сравнивать ценности ситуаций для игроков не по численным величинам, а по отношению предпочтительности, которое может задаваться и чисто качественным, нечисленным путем. Эти игры получают название игр качества. Еще одно обобщение, называемое играми с непрерывными ситуациями, получается, если считать ситуациями не произвольные комбинации стратегий игроков, а лишь некоторые, удовлетворяющие дополнительно принятым правилам игры.

Предположение об однократных и независимых выборах своих стратегий является весьма общим и охватывает как частные случаи различные возможности взаимной информированности игроков, выполнения или поочередных ходов в игре, осуществление каждым игроком выбора своей стратегии в виде последовательности частичных, уточняющих друг друга решений и

т. д. Игры, обладающие перечисленными особенностями, принадлежат к классу позиционных игр (или динамических, в отличие от статических или одноходовых игр). Наиболее характерным примером позиционной игры является шахматы. Важной разновидностью динамических игр являются дифференциальные игры, изучаемые также в математической теории управления. В этих стратегиями игроков являются некоторые допустимые управления заданной динамической системы.

Наложение на компоненты бескоалиционной игры тех или иных ограничений приводит к разнообразным частным классам таких игр. Так, если выигрыши одной из двух играющих сторон равен проигрышу другой, то такие игры называются антагонистическими, или играми с постоянной суммой. Иногда игры с постоянной суммой называют также матричными потому, что их удобно изображать с помощью так называемых матриц платежей, наиболее простым вариантом которых является матрица  $M \times N$ , где  $M$  и  $N$  — число стратегий первого и второго игроков



Рис. 16.1

соответственно. В каждой ячейке матрицы указывается размер выигрыша одной из сторон, который автоматически равен проигрышу другой (рис. 16.1). В общем случае игры с постоянной суммой каждая ячейка матрицы платежей разбивается на две части, в одной из которых указывается величина выигрыша первого игрока  $a$ , а в другой — величина проигрыша второго —  $n - a$ . (Игры, в которых выигрыши одной стороны не равняются проигрышам другой, называются также биматричными.)

#### Игры с постоянной суммой

Под решением игры вообще и игры с постоянной суммой, в частности, мы понимаем (устойчивое) распределение платежей (или средних платежей при многоходовой игре), возникающее при некотором рациональном выборе ходов участниками игры: ни один из игроков не может добиться большего выигрыша, се-

ли его противник придерживается рациональной стратегии. В свою очередь рациональными стратегиями называются такие, которые позволяют максимизировать платежи (или средние платежи) игрока, если тот знает, что его противник сделает то же самое. В теории игр с постоянной суммой доказываются теорема, которая по существу означает, что для участников игры всегда существует некая оптимальная пара стратегий. В играх с постоянной суммой это утверждение несправедливо. Одним из наиболее замечательных решений игры с постоянной суммой является так называемое решение в "седловой точке". Теорема, определяющая необходимые и достаточные условия существования этого решения носит название теоремы о седловой точке или теоремы о максимине (минимаксе).

Чтобы пояснить суть этой теоремы, приведем два примера. Рассмотрим сначала матрицу  $3 \times 3$  (2 игрока и 3 хода), изображенную на рис. 16.2, где каждый игрок имеет в своем распоряжении по три хода. В приведенном

(II)

	$B_1$	$B_2$	$B_3$
$A_1$	3 -3	1 15	-1 -20
$A_2$	1 -1	5 5	-2 2
$A_3$	2 -2	4 -4	-15 15

(I)

Рис. 16.2

примере выгодная тактика для каждого игрока состоит в том, чтобы попытаться минимизировать максимум своих проигрышей. Например, игрок 1 может рассуждать следующим образом: "Если я сделаю ход  $A_1$ , то худший для меня ход возникнет при условии, что мой противник выберет ход  $B_3$  (мой выигрыш составит тогда  $-20$ ). Если же я сделаю ход  $A_2$ , то мой выигрыш в худшем случае составит  $-1$ , а если я выберу ход  $A_3$ , то  $-4$ ". Поэтому игрок 1 делает ход  $A_2$ . Игрок 2 рассуждает аналогично: "Если я выберу ход  $B_1$ , то мой выигрыш будет не меньше 1. Если я сделаю ход  $B_2$ , то выиграю не меньше  $-18$ , а если выберу ход  $B_3$ , то не меньше  $-15$ ". Из осторожности игрок 1 выбирает ход  $A_2$ , игрок 2 — ход  $B_1$ , и они "встречаются" в квадрате  $(-1, 1)$ , т. е. в седловой точке (в том смысле, что значения платежей в этой точке минимальны по строке и максимальны по столбцу для игрока 1 и максимальны по строке и ми-

нимальны по столбцу для игрока 2). Кроме того, эта седловая точка устойчива в том смысле, что ни один из игроков не может увеличить свой выигрыш, отклоняясь от нее в одностороннем порядке.

Второй пример демонстрирует "игру в войну" (рис. 16.3). Числа в матрице платежей означают дни между столкновениями армий противников. Нападающая сторона знает, что время работает против нее и что в ее интересах вести молниеносную войну, тем самым минимизируя время между столкновениями двух армий. С другой стороны, обороняющаяся сторона выбирает стратегию затяжной войны, а именно отступает, стремясь максимизировать время между столкновениями с

(I)

	$A_1$	$B_1$	$C_1$	$D_1$	
"Обороняющаяся сторона"	7	2	5	1	$A_1$
	2	2	3	4	$B_1$
	5	3	4	4	$C_1$
	3	2	1	6	$D_1$

"Нападающая сторона"

Рис. 16.3

тем, чтобы использовать передышки для организации сопротивления и уменьшения нападающей стороны. Какое решение примет каждый из участников игры, анализируя все возможные стратегии, представленные на рис. 16.3? Обороняющаяся сторона попытается максимизировать свои минимальные выигрыши, а нападающая сторона — минимизировать свои максимальные выигрыши.

Нападающая сторона рассуждает следующим образом: "Если я выберу стратегию  $A_1$ , то в худшем случае мне придется ждать 7 дней до столкновения. Если я выберу стратегию  $B_1$ , то в худшем случае мне придется ждать 2 дня. Если я остановлю свой выбор на стратегии  $C_1$ , то мне придется ждать не больше 5 дней, а если я предпочту воспользоваться стратегией  $D_1$ , то ждать мне придется самое большее 6 дней. Это — мои максимальные проигрыши. Чтобы их минимизировать, я выбираю стратегию  $B_1$ ".

Обороняющаяся сторона рассуждает следующим образом: "Моя задача состоит в том, чтобы замедлить противника. Если я выберу стратегию  $A_1$ , то в худшем случае мне придется ждать 1 день. Если я предпочту выбрать стратегию  $B_1$ , то ждать придется

2 дня. Стратегия C) дает 3 дня и стратегия D) — 1 день. Это — мои минимальные выигрыши. Чтобы их максимизировать, я выбираю стратегию C)\*.

И участники игры выбирают квадрат (C, B), в который вписано число, минимальное среди чисел, стоящих в той же строке, и максимальное среди чисел, стоящих в том же столбце. Эта пара стратегий устойчива, так как при выборе со стороны каждого игрока отклониться от нее в одностороннем порядке он увеличивает свой проигрыш.

Решения, полученные в приведенных примерах, относятся к решениям в седловой точке. Иногда их также называют максиминными или минимаксными решениями, а принцип, с помощью которого они получаются, — принципом максимина или принципом гарантированного результата. Поскольку решения выполняются при любом рациональном поведении игроков и без каких-либо дополнительных ограничений, такие решения также называют решениями в "чистых стратегиях". Получить решения в чистых стратегиях удается далеко не всегда. Тогда прибегают к так называемым "смешанным стратегиям".

В случае смешанных стратегий матрица платежей не имеет седловой точки, поэтому игра не может быть решена одним ходом. Стратегии игроков образуются путем смешения всех или части имеющихся у них стратегий в процессе многоходовой игры. Пусть  $x$  — вероятность того, что игрок 1 выбирает ход  $A_1$  (см. рис. 16.1),  $y$  — вероятность того, что игрок 2 выберет ход  $B_2$ . При таких условиях средние размеры (математическое ожидание) выигрыша составляют величины

$$G_1(x, y) = ax + b(1-x)y + cx(1-y) + d(1-x)(1-y) \quad (16.1)$$

для игрока 1 и

$$G_2(x, y) = a - G_1(x, y) \quad (16.2)$$

для игрока 2.

Логика принятия стратегий  $A_j$  или  $B_j$  ( $i, j = \{1, 2\}$ ) игроками очевидным образом связана со средними выигрышами, а именно: скорость изменения вероятности  $x$  или  $y$  (т. е.  $dx/dt$  или  $dy/dt$ ) пропорциональна произвольной от средней прибыли, получаемой

игроком, принявшим, соответственно, стратегию  $A_1$  или  $A_2$ ,  $B_1$  или  $B_2$ . Следовательно, можно записать уравнения

$$dx/dt = dG_1/dx; \quad (16.3)$$

$$dy/dt = dG_2/dy.$$

Итак, логика участников игры трансформировалась (или "светлеет") в двум связанным линейным дифференциальным уравнением. Подставляя вместо  $G_1$  и  $G_2$  соответствующие выражения, получаем

$$dx/dt = y(a - b - c + d) + c - d, \quad (16.4)$$

$$dy/dt = x(-a + b + c - d) - b + d,$$

откуда находим стационарное состояние

$$X_0 = (d - b)/(a - b - c + d), \quad (16.5)$$

$$Y_0 = (d - c)/(a - b - c + d).$$

Можно показать [25], что полученное решение устойчиво.

#### Игры с непостоянной суммой

Как уже отмечалось, среди игр двух лиц необходимо различать игры, в которых интересы участников диаметрально противоположны (игры с постоянной или нулевой суммой), и игры, в которых интересы участников частично противоположны, а частично совпадают (игры с непостоянной суммой). В играх с постоянной суммой сумма выигрышей двух игроков всегда одна и та же независимо от того, как заканчивается игра: чем больше выигрыш одного игрока, тем меньше выигрыш другого. Именно в этом и заключается "диаметральная противоположность" интересов участников игры, их антагонизм.

Решение игры двух лиц с постоянной суммой — это пара чистых или смешанных стратегий (включаясь в распоряжения игроков), которые находятся в равновесии: ни один из игроков не может увеличить свой выигрыш, если его партнер придерживается стратегия, предписанной решением игры.

В играх с непостоянной суммой у участников в общем случае имеются общие совпадающие интересы и противоположные игры. Такие игры иногда называют играми со смешанными мотивами. Для игр с непостоянной суммой можно доказать существование положений равновесия, но уже невозможно предписывать оптимальные стратегии в терминах этих положений равновесия, так как выбор каждым игроком стратегий, содержащих положения равновесия, еще не гарантирует равновесного исхода игры. Поэтому в играх с непостоянной суммой не существует оптимальных стратегий (т. е. решений, которые гарантировали бы устойчивость выбранной пары стратегий в том смысле, что одностороннее или даже двустороннее отклонение от нее только ухудшает положение игрока). В таких играх понятие рациональной стратегии требует уточнения и обобщения. Оказывается, что коды, предписываемые соображениями индивидуальной рациональности, могут существенно отличаться от кодов, выбираемых из соображений коллективной рациональности. "Парадоксы" возникают, когда понятие рационального решения, адекватное на одном уровне конфликта, переносится на другой уровень. Таким образом, в случае игр двух лиц с непостоянной суммой понятие рациональной стратегии как бы претерпевает разделение на индивидуальную и коллективную рациональную стратегию, причем весьма часто они не совпадают, и возникает понятие торга как средства достижения субоптимального решения. Игры с непостоянной суммой обычно разделяют на игры с непостоянной суммой и торгом, и парадоксальные игры с непостоянной суммой.

Изложение существа игры с непостоянной суммой и торгом найдем с одного характерного примера, показанного на рис. 16.4. Здесь игроку 1 необходимо выбрать либо строку  $A_1$ , либо строку  $B_1$ . Если бы он знал, какую стратегию выберет игрок 2, то принять решение для него не составляло бы особого труда: если бы игрок 2 выбрал стратегию  $A_2$ , то игрок 1 выбрал бы стратегию  $B_1$ , которая обеспечивает ему выигрыш 4. Если бы игрок 2 выбрал стратегию  $B_2$ , то игрок 1 выбрал бы стратегию  $A_1$ , которая обеспечивает ему выигрыш 3. Но игрок 2 стоит перед такой же проблемой принятия решения. Если бы он был уве-

рен, что игрок 1 постарается обеспечить себе максимальный выигрыш (выберет стратегию  $B_1$ ), то игрок 2 не мог бы выбрать для себя лучшей стратегии, чем  $A_2$ . Но у игрока 2 нет уверенности в том, что игрок 1 не захочет рискнуть и не предпочтет стратегию  $A_1$  (в расчете на то, что игрок 2 будет стремиться обеспечить себе максимальный выигрыш 8). В этом случае игрок 2 мог бы получить максимальный выигрыш. Очевидно, что в такой игре оптимальной чистой стратегии нет ни для одного игрока. Посмотрим, как обстоит дело в случае смешанных стратегий.

(II)

	$A_2$	$B_2$
$A_1$	7	8
$B_1$	2	3
	$A_2$	$B_2$
$B_2$	4	0

(I)

Рис. 16.4

Остатки (на время) в стороне вопрос о выигрыше противника, каждый игрок может выбрать смешанную стратегию, которая гарантирует ему минимальный выигрыш независимо от того, какую стратегию выберет его противник. Существует много алгоритмов, позволяющих найти такую смешанную стратегию. Но, предположим, что смешанные стратегии для игрока 1 определяются путем вычисления разности платежей для каждой строки (для первой строки такая разность равна  $3 - 2 = 1$ , для второй строки —  $4 - 0 = 4$ ), обращения полученных значений в случайного четырехкратного выбора  $A_1$  при каждом выборе  $B_1$ . Аналогично, игрок 2 применяет стратегии  $A_2$  с вероятностью  $8/11$  и стратегии  $B_2$  с вероятностью  $3/11$ .

Игрок 1, применяя стратегии  $A_1$  с вероятностью  $4/5$  и стратегии  $B_1$  с вероятностью  $1/5$ , гарантирует себе выигрыш

$$1/2 \cdot 4/5(2 + 3) + 1/2 \cdot 1/5(4 + 0) = 12/5$$

(в предположении о полном неведении — с вероятностями  $1/2, 1/2$  — относительно вероятностей выбора игроком 2 стратегий  $A_2, B_2$ ).

Аналогично игрок 2 гарантирует себе выигрыш

$$1/2 \cdot 8/11(1 + 4) + 1/2 \cdot 3/11(8 + 0) = 32/11.$$

На первый взгляд кажется, что эту пару смешанных стратегий (гарантирующих каждому игроку "прожиточный минимум") можно принять за решение игры. Однако это решение не удовлетворительно: оба игрока могли бы выиграть больше указанных выше гарантированных минимумов, если бы, например, игрок 1 выбрал стратегию  $B$ , а игрок 2 — стратегию  $A$ . Для того, чтобы получить более крупные выигрыши, игрокам необходимо координировать свои действия. Разумеется, проблема выработки соглашения о выборе той или иной пары стратегий (или смешанных стратегий) остается, так как при выборе пары стратегий ( $B$ ,  $A$ ) преимущество получает игрок 1, а при выборе пары стратегий ( $A$ ,  $B$ ) — игрок 2. Но относительно какой бы из этих двух пар (или смешанной стратегии) игроки ни пришли к соглашению, любая из них обеспечивает каждому игроку выигрыш, превышающий гарантированный уровень, соответственно в 12/5 и 32/11.

Неспособность координировать стратегии в данном случае надлежит отнести за счет отсутствия связи между двумя партиями. Предположим, что игроки каким-то образом договорились о выборе пары стратегий ( $A$ ,  $B$ ) [или ( $B$ ,  $A$ )]. Тогда ни у одного из игроков не было бы мотива для нарушения соглашения, так как выбор игроком другой стратегии, в то время как его противник придерживается достигнутого соглашения, уменьшает бы выигрыши "нарушителя". Таким образом, каждая из двух приведенных выше пар стратегий представляет собой равновесие: ни один из двух игроков не может повысить свой выигрыш (и, вообще говоря, лишь уменьшит его), если отойдет от равновесия, а то время как другой игрок будет по-прежнему придерживаться соглашения (принцип минимакса: одностороннее отклонение наказывается).

Но если в рассматриваемой игре обстоятельства позволяют установить связь между игроками и координировать стратегии, то ситуация меняется: в этом случае игроки могут путем торгов (переговоров) согласиться относительно пары стратегий, дающих преимущества каждому из них. В игре с постоянной суммой такое невозможно, так как в такой игре, чем лучше исход игры для одного игрока, тем он хуже для другого. В игре с

переменной суммой могут существовать исходы, предпочтительные для обоих игроков по сравнению с другими возможными исходами.

Итак, математическая задача состоит в том, чтобы на кривой возможных исходов переговоров (множестве "предмет торга") найти одну точку ( $G_x$ ,  $G_y$ ), которую можно было бы определить как рациональное решение, или рациональное решение конфликта (рис. 16.5). Можно доказать, что точка множества "предмет торга", совпадающая с вершиной прямоугольника наибольшей площади, является решением при двух условиях: во-первых, множество "предмет торга" заранее задано и, во-вторых, противоположная вершина прямоугольника — "статус-кво" — также заранее задана.

В общем случае очевидно, какой должна быть в различных играх точка "статус-кво". Можно показать, что в данной игре "множество торга" представляет собой прямую  $G_x + G_y = 11$  (рис. 16.6) с точкой "статус-кво"  $G_{x0} = 12/5$ ,  $G_{y0} = 32/11$ . Тогда решение задачи найдем из условия максимума величины

$$F = (G_x - 12/5)(11 - G_x - 32/11).$$

Пологая  $dF/dG_x = 0$ , получаем  $11 - G_{x0} - 32/11 - G_{x0} + 12/5 = 0$ , откуда

$$G_{x0} = 5,25 \text{ и } G_{y0} = 5,75.$$

Чтобы склонить игрока 1 принять множество "предмет торга", игрок 2 должен пойти на весьма серьезные уступки. Однако существует способ, позволяющий убедиться в

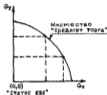


Рис. 16.5



Рис. 16.6

том, что игрок 2 уступает игроку 1 "по справедливости". Будем считать, что полный выигрыш, получаемый "коалицией" из двух игроков, делится между ними в соответствии со следующим принципом: каждый партнер получает столько, сколько может, вступая в коалицию.

Предположим, что коалиция состоит из игрока 1, первым вступившего в "пустую" коалицию. В коалиции с самим собой игрок 1 получает выигрыш, равный его уровню "безопасности", т. е.  $12/5$ . Если первым в пустую коалицию вступает игрок 2, то коалиция, состоящая из одного человека, может получить выигрыш  $32/11$  (уровень "безопасности" игрока 2). Присоединяясь к коалиции, игрок 1 позволяет (буквально и фактически) коалиции из двух человек получить выигрыш, равный 11. Следовательно, он присоединяется к коалиции, в которой присоединяется,  $11 - (32/11) = 89/11$ , и получает (на этой стадии) право на выигрыш в размере  $9/11$ . Однако мы предполагаем, что порядок, в котором образуется коалиция, чисто случайный. (Каждая из двух возможных последовательностей образования коалиции имеет вероятность  $1/2$ .) Следовательно, выигрыш, назначаемый игроку 1, должен быть средним арифметическим (с одинаковыми весами  $1/2$ ) величин  $12/5$  и  $89/11$ , т. е. равен  $(1/2 \cdot 12/5) + (1/2 \cdot 89/11) = 5,25$ . Игрок 2 получает остальное, т. е.  $11 - 5,25 = 5,75$ .

Наиболее характерной особенностью парадоксальных игр с несогласной суммой является то, что в этих играх добиться максимально возможного выигрыша участникам мешает не их неспособность координировать свои стратегии, а желание каждого действовать в соответствии со своими индивидуальными интересами. Кроме того, парадоксальные игры отличаются также тем, что вместо двух точек равновесия, как в только что рассмотренных играх, они имеют только одну точку равновесия, которая, однако, является неудовлетворительным решением для каждого из игроков. Иными словами, если бы рациональные игроки смогли бы договориться, то они пришли бы к эффективному решению. Однако такой исход в парадоксальных играх не является точкой равновесия: каждый игрок, отклоняясь от согласованной стратегии в одностороннем порядке, увеличил бы свой выигрыш, а если бы оба игрока парным достигли соглас-

ования, то они оба проиграли бы. Очевидно, что в такой игре не может быть и речи о решении в чистой стратегии. Не дает результата и использование смешанных стратегий. В этом случае рассматриваются иные алгоритмы, суть которых составляют механизмы самообучения игроков в процессе игры.

До сих пор вопросы, относящиеся к теории игр, нами излагались в рамках традиционного аппарата, характерного для матричных представлений и дискретной постановки задачи. В последние десятилетия появилось большое количество работ, описывающих процесс игры в терминах непрерывных переменных с широким использованием аппарата дифференциального исчисления. Заметный след в этом направлении оставил Ю. Б. Гермейер (1918—1975). Его работы явились крупным шагом в области формализации процедур принятия решений и, в частности, теории игр. В соответствии с выработанным подходом, если  $i$ -й участник выбрал (по каким-то соображениям) значение параметра  $X_i$  равным  $X_{i0}$ , то его действия формально могут быть описаны как стремление к максимизации функции  $F_i = -|X_i - X_{i0}|$ . Поэтому любое принятие решений  $i$ -м участником процесса может трактоваться (хотя бы апостериори) как целестремленное, направленное к увеличению значения некоторой величины  $W_i$  (критерия эффективности, платежа, выигрыша и т. п.), зависящей в общем случае от выборов всех  $n$  участников процесса, т. е.

$$W_i = f(X_1, \dots, X_n), \quad i = 1, \dots, n.$$

Описанный таким образом процесс со многими участниками, преследующими различные интересы и ограниченными в свободе выбора  $x_i$  из множества  $\{X_i\}$ , и носит название игры.

По Ю. Б. Гермейеру обычная оптимизация соответствует либо  $n = 1$ , либо случаю совпадения интересов всех игроков,  $F_i = F_j, i = 1, \dots, n$ . Антагонистическая игра получается при  $n = 2$ , если  $F_1 = -F_2$ . И так далее. В целом, Ю. Б. Гермейером создана мощная и глубокая отечественная школа теории игр, основой которой является получение обобщающих результатов, позволяющих осуществлять формальные переходы от результа-

тов, получаемых в области игрового подхода на другие разделы теории принятия решений.

Современное состояние теории игр позволяет рассматривать в целом ряде самых разнообразных приложений. В то же время, не следует считать этот аппарат универсальным средством обоснования решений, поскольку понятие игры подразумевает присутствие в задаче таких вполне определенных ее атрибутов, как игроки, стратегия поведения игроков, выигрыши (проигрыши) и правила игры. В прошлом кораблестроения методы теории игр до настоящего времени не получали сколько-нибудь широкого распространения. Наиболее подходящей областью приложения этой теории пока остается теория оценки боевой эффективности и в некоторых случаях программное планирование. Что касается основной задачи проектирования и подходов к обоснованию проектных решений, то здесь наиболее приемлемой остается теория оптимизации. Возможно со временем, когда для проектных исследований вопросы устойчивости получаемых решений и мотивы распределения выделяемых ресурсов приобретут большую актуальность, перспективы приложения теории игр к задачам воинского кораблестроения станут оптимистичнее.

#### 1.2. ОСОБЕННОСТИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Принятие любого решения связано с наличием необходимых для этого исходных данных. Отсутствие исходных данных или неопределенность в их знании существенно усложняет принятие решения, требует увеличения количества принимаемых для рассмотрения альтернативных вариантов. Однако, для ряда случаев неопределенности разработаны подходы, позволяющие находить необходимые решения. Рассмотрим эти подходы.

##### *Виды неопределенности в задаче по обоснованию проектных решений*

Весь процесс разработки проекта корабля, строительства его на судостроительных предприятиях можно рассматривать как процесс перехода от замысла корабля (с неопределенными ТТХ)

к реальному объекту с вполне определенными ТТХ, главными размерностями, боевыми возможностями.

Этот процесс можно рассматривать как управляемый переход от состояния к состоянию в направлении убывания степени неопределенности по отношению к облику будущего реального корабля, т. е. как переход от состояния неопределенности к состоянию определенности. При этом происходит чередование этапов использования творческих возможностей человека и этапов использования формальных средств, основанных на аппарате различных математических дисциплин.

Соотношение этих сторон в процессе принятия проектных решений зависит от:

- степени изученности создаваемой системы;
- компетентности, ответственности, личных качества руководителей, обоснованности требований к характеристикам системы и руководителей проектных работ;
- наличию времени для принятия решений (чем меньше времени, тем больше используется субъективных подходов).

Неопределенность проявляется:

при определении целей создания системы, формулировке задач, которые она должна будет решать через отдаленные промежутки времени:

— при оценке параметров создаваемой системы, возможных пределов их изменения;

— при оценке параметров среды, в которой будет действовать система, в том числе состава и ТТХ сил противника, способов их использования, состава своих сил и средств взаимодействия, способов их использования;

при оценке возможностей достижения необходимых значений характеристик подсистем на момент создания системы, оценке возможностей промышленных предприятий (по водоизмещению и главным размерностям корабля, трудоемкости, срокам постройки);

— при определении элементов жизненного цикла, в том числе сроков эксплуатации в мирное и военное время, объемов и сроков проведения модернизации корабля;



— при выборе вида критериев эффективности, их соотношения в многокритериальных задачах, при концептуальном представлении об оптимальном решении (о мере компромисса);

— при разработке математической модели, адекватной реальной системе; при описании структуры системы, состава ее элементов и их параметров, основных связей, при определении способов описания системы, математическом представлении ее внутреннего и внешнего функционирования.

В зависимости от объема сведений об исследуемом факторе можно выделить различные ситуации задания параметра: определенность, риск, неопределенность, а также неосведомленность (см. таблицу 16.1).

Таблица 16.1

Ситуация	Форма задания параметра	Методы отыскания решения
Определенность	Численные значения	Методы математического программирования
Риск	Закон распределения	Методы теории вероятностей, математического программирования, статистических испытаний, экспертные процедуры
Неопределенность	а) Диапазон б) Наименование параметра	Теория игр, Теория статистических решений, Экспертные процедуры
Неосведомленность	Ничего не известно о факторе	Отсутствуют (методич. ошибок)

Принятие решений при определенности (детерминированные задачи принятия проектных решений) характеризуется существованием однозначной, детерминированной связи между принятым решением и его результатом.

При заданных значениях управляемых переменных и детерминированных значениях параметров системы должны получаться и однозначные оценки системы.

Для ситуации определенности характерно применение методов исследования операций, когда отыскивается лучшее решение при известных характеристических фрейды, в которой действует система.

Вторая и третья ситуации задания параметра (риск — неопределенность) представляют наибольший методический интерес.

Чтобы уяснить различие между этими двумя ситуациями, рассмотрим простой пример.

Имеется две коробки, в каждой из которых лежит по 10 билетов. В первой — билеты с номерами от 1 до 10, во второй — билеты с неизвестными номерами. Игрок вызывает число и наугад вытягивает билет. Совпадение четности (нечетности) заданного числа и номера на билете соответствует выигрышу.

Выпавшему билету из первой коробки соответствует ситуация риска (известно, что 50% билетов с четными номерами, 50% — с нечетными), из второй коробки — ситуация неопределенности.

Ситуации риска и неопределенности существенно различаются по степени изученности и возможности формализации.

Ситуация риска достаточно изучена, она формализуется методами теории вероятностей, в ней закон распределения случайной величины известен и задан на основе объективных данных.

Ситуация неопределенности менее исследована, в ней закон распределения случайной величины неизвестен и может быть задан только на основе субъективных оценок.

Неопределенные параметры могут быть в общем случае заданы:

- максимальным диапазоном возможных значений параметров;
- расчетным диапазоном, который может быть задан в требованиях на разработку проектируемого элемента;
- номинальными значениями параметров.

При принятии проектных решений могут иметь место неопределенности различной природы:

- в параметрах противобойствия противника;
- в параметрах природных условий функционирования системы;
- в параметрах проектируемой системы;

В тех случаях, когда известен закон распределения случайной величины, при принятии проектных решений могут быть использованы специальные подходы, позволяющие учесть или устранить неопределенность в задании того или иного параметра [153].

Учет неопределенности характеризуется тем, что исследователю не влияют на сами неопределенные факторы, а только методически их учитывает. Решения по системе принимаются, исходя из возможности ее создания и функционирования во всем диапазоне значений неопределенных факторов. Учет неопределенности может быть произведен и с помощью задания ограничений.

Устранение неопределенности связано с уменьшением ее влияния за счет уточнения неопределенных факторов и компенсации возможных потерь, обусловленных неопределенностью, за счет соответствующих технических решений по проектируемой системе.

Методические приемы учета неопределенности применяются при формировании исходных данных и при разработке методик.

К методическим приемам, применяемым при формировании исходных данных, могут быть отнесены равнозначимый анализ и ограничение числа стратегий [153].

Равнозначимый анализ основан на выделении групп характеристик в соответствии со степенью их влияния на эффективность системы и с учетом достоверности их значений. Неопределенные факторы, слабо влияющие на эффективность, могут быть исключены из рассмотрения.

Ограничение числа стратегий проводится на основе сопоставления степени влияния на эффективность системы выбора стратегий и неопределенных параметров. Если влияние выбора стратегий сопоставимо с влиянием неопределенности самих параметров, то такие стратегии могут не рассматриваться. При решении задачи оптимизации проектных решений ограничиваются обычно некоторыми типовыми стратегиями. Например, при расчете долиности действия ГАК ограничиваются лишь основными типами гидрологических условий.

— в параметрах процессов функционирования системы.  
Все эти факторы представляют собой неопределенности исходных данных, необходимых для оценок проектируемой системы.

В общем случае они условно могут быть сведены в 3 группы.

1. Факторы, связанные с параметрами возможного противодействия. В основном эти факторы описываются ситуацией неопределенности, например, неизвестен состав противолодочных сил противника при развертывании наших сил в районе боевых действий.

2. Неопределенные параметры, обусловленные недостаточностью сведений о технических характеристиках проектируемой системы.

К группе риска может быть сведено наличие допущков на параметры технических решений подсистем и элементов системы (удельная масса энергетической установки, предел текучести материала прочного корпуса и т. д.).

К ситуации неопределенности может быть отнесена возможность использования новых открытий при создании отдельных элементов проектируемой системы.

Основной комплексацией технической неопределенности на этапе проектирования могут являться такие мероприятия, как модельный эксперимент по отдельным элементам или по системе в целом, выделение резерва ресурса (например, запасы водонесущих на проектирование корабля, запасы по массозабаритным характеристикам при разработке комплексов оружия, радиоэлектронного вооружения и технических средств).

3. К третьей группе можно отнести неопределенности действующей системы и неопределенности условий, в которых действует система. Эти неопределенности обусловлены случайным характером указанных факторов (результатов применения оружия, поиска сил противника и т. п.), описываются ситуацией риска и могут учитываться методами теории вероятностей.

Для редких событий в условиях малого числа практических реализаций использования системы требуется дополнительное исследование устойчивости рекомендаций, оценки доверительных вероятностей и т. д.

К методическим приемам, позволяющим учитывать неопределенность и применяемым при разработке методики, могут быть отнесены: выделение уровней математических моделей, выделение этапов функционирования системы и др.

Выделение уровней математических моделей, применяемых при исследовании эффективности системы, производится в соответствии с обеспеченностью исходными данными и степенью их неопределенности. При наличии неопределенных факторов, которые нельзя формализовать или как-то учесть в модели, рассматривается уровень модели (поднимается вверх) и оценивается возможность проведения исследований на этом уровне.

Например, если характеристики ходовых свойств корабля не могут быть рассчитаны из-за отсутствия данных по размерам и форме корпуса, то при расчетах на начальных стадиях проектирования рассматривают модель корабля в целом, а не модель его ГЭУ, и при этих расчетах вместо целого ряда параметров пользуются одним — адмиралтейским коэффициентом.

Выделение этапов функционирования системы предполагает замену моделей этапов, имеющих высокую степень неопределенности, их выходными параметрами, которые задаются в виде исходных данных.

Например, если нет необходимых данных для расчета показателя эффективности применения оружия, чувствительного к характеристикам комплекса оружия и объекта поражения, то tieto в качестве исходной величины принимают вероятность попадания одного снаряда, которая является выходной характеристикой в модели комплекса оружия.

При учете неопределенности с помощью задания ограничений предполагается, что ограничения могут накладываться как на условия использования системы (ограничения по противнику), так и на саму систему.

Можно предполагать, что силы противобойствия противника распределяются наилучшим для создаваемой системы образом и что противник будет реагировать на появление нашей системы. Первое допущение отражает конфликтную ситуацию, которая исследуется методами теории игр. Второе допущение приводит к заданию ограничений по уровню противодействия

противника, который могут быть учтены с помощью принципа сбалансированности.

Принцип сбалансированности означает, что при выборе рационального варианта проектируемой системы необходимо учитывать лишь то множество вариантов, при котором система способна выполнять поставленные перед ней задачи.

Устранение неопределенности связано с уменьшением ее влияния на основе уточнения неопределенных факторов, обусловленных неопределенностью, за счет соответствующих решений по проектируемой системе.

Одним из приемов устранения неопределенности является параллельная разработка нескольких вариантов, каждый из которых может быть оптимальным в ограниченном диапазоне параметров окружающей среды. Она допустима при малой стоимости разработки элементов и при разработке вариантов в различных организациях.

### 16.3. ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗВИВАЮЩИХСЯ СИСТЕМ

До сих пор проводимые нами рассуждения так или иначе предполагали, что все планируемые исследования направлены на обоснование решений применительно к вновь создаваемым кораблям. В более крупном масштабе, корабельного состава ВМФ в целом, это означает, что в соответствии с рекомендуемыми решениями мог бы быть заново создан оптимальный корабельный состав флота. Однако на самом деле речь может идти не о создании нового флота, так сказать, с "чистого листа", а лишь о строительстве кораблей нового поколения какого-либо одного класса (серии кораблей нового проекта). В этом случае в качестве системы, т. е. объекта исследования, должен выступать не один корабль или серия кораблей одного проекта, а вся совокупность кораблей определенного класса, включающая как ранее построенные и находящиеся на некоторый момент времени в составе флота, так и вновь создаваемые (строящиеся) корабли этого класса. Такие системы, в которых наряду с создаваемыми вновь рассматриваются также уже существующие объекты, по-

лучши название развивающихся. Целью построения и исследования развивающихся систем в военном кораблестроении является обоснование проектных решений с учетом взаимодействия видов создаваемого корабля (поколения кораблей) с уже существующими кораблями флота.

Актуальность исследования развивающихся систем для Военно-Морского Флота обуславливается такими практическими проблемами, как формирование кораблестроительной программы развития флота, обоснование типов и классов кораблей в его составе, оптимизация этапов жизненного цикла кораблей, балансирование состава боевых кораблей и вспомогательных судов и рядов других.

Как известно, срок службы корабля обычно сравним со временем строительства серии кораблей. Так, для кораблей среднего водоизмещения срок службы составляет около 25 лет. При этом, строительство кораблей такого класса по одному проекту может продолжаться от 8 до 15 лет и более. Это обстоятельство заставляет при моделировании развивающихся систем учитывать динамику поступления новых кораблей в состав флота и убыли выслуживших свой срок кораблей. Необходимость моделирования временного фактора в развивающихся системах становится более очевидной, если учесть, что в процессе жизненного цикла корабль может находиться в различных состояниях: постоянной боевой готовности, межпоходном ремонте, заводском ремонте и т. п. Каждому из этих состояний соответствует своя боевая эффективность корабля и текущие затраты. Таким образом, временные интервалы, характеризующие различные друг от друга состояния флота, становятся noticeably меньше, чем продолжительность жизни отдельного корабля.

Системы, позволяющие рассматривать параметры, меняющиеся во времени, называются динамическими, в отличие от всех тех, которые нами рассматривались ранее и в этом смысле могут называться статическими. Так же как и статическая система, динамическая система по своей математической природе — это пара множества с отношениями между их элементами: множество входов и множество выходов. При этом дополнительным условием по отношению к статическим системам ста-

новится назначение в каждый момент времени наряду со значительными элементами множества выходов, еще одного элемента некоторого множества, называемого множеством состояний динамической системы.

Обозначим множество входов  $\{X\}$ , множество выходов  $\{Y\}$ , а множество состояний системы  $\{S\}$ . Тогда динамическую систему можно определить как некоторый оператор, отображающий  $\{X\}$  в  $\{Y\}$  для фиксированных значений из  $\{S\}$ :

$$Y = F(S(X)). \quad (15.6)$$

Динамические системы, встречающиеся на практике, описываются математическими моделями, которые получаются из (15.6) путем уточнения входящих в него множеств или оператора  $F$ . Учитывая, что основным отличительным параметром динамической системы является время, выдем в рассмотрении упорядоченное множество моментов времени  $\{T\}$ , которое будет фиксировать, в какой последовательности значения множеств  $\{X\}$ ,  $\{Y\}$ ,  $\{S\}$  реализуются. При этом динамические системы различаются:

- видом множества моментов времени  $\{T\}$ ;
- видом множеств  $\{X\}$ ,  $\{Y\}$ ,  $\{S\}$ ;
- типом оператора  $F$ .

Элементы множеств  $\{X\}$ ,  $\{Y\}$ ,  $\{T\}$  могут быть как дискретными, так и непрерывными. В зависимости от этого различают системы непрерывные по времени и состояниям; непрерывные по времени и дискретные по состояниям; дискретные по времени и непрерывные по состояниям; дискретные по состоянию.

По типу оператора  $F$  системы делят на линейные и нелинейные, стационарные и нестационарные, причинные и не причинные, детерминированные и стохастические.

Одними из наиболее простых примеров динамических систем, ведущих к пониманию развивающихся моделей, являются непрерывные динамические системы с непрерывным временем типа "линейки—жертвы" /74/. При постановке этой задачи делается предположение о том, что на достаточно коротком интервале времени в достаточно многочисленной популяции число

рождений и смертей пропорционально общей численности индивидуумов

$$dN = eNdt. \quad (16.7)$$

Интегрируя (16.7), получим

$$N = N_0 \exp(e(t - t_0)). \quad (16.8)$$

Выражение (16.8) представляет собой экспоненциальный закон развития видов. Рассмотренная задача получит дальнейшее развитие если предположить, что внешняя среда медленно меняется, а именно:

$$dN/dt = e(t)N(t).$$

При этом, рассматривая несколько видов одновременно, например два, можно сформулировать задачу о борьбе за общую пищу. Если количество пищи, подаваемой в единицу времени, представить функцией  $F(N_1, N_2)$ , то естественно взять в качестве коэффициента прироста каждого вида выражение

$$e_i = g_i F(N_1, N_2).$$

Из сделанных предположений система дифференциальных уравнений, описывающих процесс борьбы за общую пищу примет вид:

$$\left. \begin{aligned} dN_1/dt &= (e_1 - g_1 F(N_1, N_2))N_1, \\ dN_2/dt &= (e_2 - g_2 F(N_1, N_2))N_2, \end{aligned} \right\} \quad (16.9)$$

Можно показать, что тот вид, у которого отношение  $e/g$  меньше, с течением времени исчезнет. Тогда в первом приближении вместо системы (16.9) решение задачи может быть записано в виде:

$$\left. \begin{aligned} F(N_1, N_2) &= a_1 N_1 + a_2 N_2, \\ dN_1/dt &= (e_1 - g_1 a_1 N_1)N_1, \end{aligned} \right\} \quad (16.10)$$

Решение уравнений типа (16.10) может быть получено следующим путем:

$$dx/dt = ax - bx^2.$$

Разделив переменные, получаем

$$\int dx/x(ax - bx^2) = dt.$$

Так как  $1/(x(ax - bx^2)) = 1/(ax) + b/(a - bx)$ , то

$$1/a \int dx/x + b/a \int dx/(a - bx) = \int dt,$$

или, интегрируя,

$$1/a (\ln(x) - \ln(a - bx)) = 1/a \ln(x/(a - bx)) = t + C.$$

Если  $x(t_0)$  стремится к 0, то  $C = 1/a \ln(x(t_0)/(a - bx(t_0)))$

или

$$x(t) = x(t_0) \exp(at) (a - bx(t_0)) + bx(t_0) \exp(at).$$

Следующий шаг в развитии задачи состоит в рассмотрении взаимосвязи двух популяций  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$ . Конкуренция между ними означает, что особи каждой из популяций подавляют репродукцию особей другой популяции.

$$\left. \begin{aligned} dx_1/dt &= x_1(a_1 - a_{11}x_1 - a_{12}x_2), \\ dx_2/dt &= x_2(a_2 - a_{21}x_1 - a_{22}x_2), \end{aligned} \right\} \quad (16.11)$$

где  $a_i$  — коэффициенты рождаемости;  $a_{ii}$  — показатели смертности;  $a_{ij}$  — показатели перекрестных связей.

Решением этой задачи будут стационарные равновесные точки, координаты которых являются решениями системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} x_1(a_1 - a_{11}x_1 - a_{12}x_2) &= 0, \\ x_2(a_2 - a_{21}x_1 - a_{22}x_2) &= 0. \end{aligned} \right\}$$

В качестве этих решений мы имеем два стационарных состояния:  $x_1 = 0, x_2 = a_2/a_{22}$  и  $x_1 = a_1/a_{11}, x_2 = 0$ , соответствующим случаю, когда один из видов умирает, а другой достигает равновесия. Третье стационарное состояние соответствует устойчивому сосуществованию в точке пересечения прямых

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 = a_1;$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 = a_2.$$

Подобные рассмотренным выше модели разрабатываются и применительно к военному делу. Так, при оценке боевой эффективности могут быть использованы модели, разработанные Ланчестером еще в период 1-й мировой войны [244]. В этих моделях предполагается:

- имеются две противоборствующие однородные группировки  $A$  и  $B$ ;
- каждая боевая единица, входящая в эти группировки, производит пуассоновский поток выстрелов;
- в случае поражения цели осуществляется перенос огня;
- каждая из сторон непрерывно пополняется резервами;
- суммарная мощь сторон пропорциональна числу боевых единиц.

В этом случае бой между противоборствующими сторонами описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} dN_1/dt &= -bN_1(t) + m(t); \\ dN_2/dt &= -aN_2(t) + v(t), \end{aligned} \right\} \quad (16.12)$$

где  $N_1$  — число боевых единиц стороны  $A$ ;  $N_2$  — число боевых единиц стороны  $B$ ;  $a, b$  — плотность пуассоновских выстрелов по стороне  $B$  и  $A$  соответственно;  $m(t), v(t)$  — темпы восполнения сторон  $A$  и  $B$ .

Система уравнений (16.12) может быть решена любым из известных методов подобно тому, как это было сделано применительно к (16.10) или (16.11).

В военно-экономическом анализе, помимо оценки боевой эффективности, всегда выполняется оценка экономических возможностей производства. Примером динамической модели здесь может стать задача развития производства (динамическая многопродуктовая модель, [178]). Внутренними силами, обуславливающими развитие производства, являются капитальные вложения. Последние создаются за счет произведенного продукта  $V$  и образуют его накапливаемую часть — фонд накопления  $H$ . Остальная часть продукта составляет фонд потребления  $W$ .

Фонд накопления условно разбивают на две части. Первая часть составляет производственные фонды, расходуемые на уве-

личение и совершенствование средств производства. Вторая часть направлена на повышение информативного потенциала производства, куда входят капитальные затраты на развитие науки и образования. В дальнейшем с целью упрощения будем рассматривать единый фонд накопления  $H$  и считать, что эффект от капиталовложений реализуется без запаздывания.

Рассмотрим случай, когда имеется  $l$  производств, выпускающих  $m$  видов продукции. Каждый  $i$ -й вид продукции производится  $j$ -ым производством с интенсивностью  $v_{ij}$ , расходуется на потребление с интенсивностью  $w_{ij}$  и на воспроизводство  $j$ -го производства с интенсивностью  $x_{ij}$ . Интенсивность накопления продукта  $i$ , идущего в фонд накопления  $j$ -го производства, обозначим  $h_{ij}$ . Уравнение баланса для производства  $i$ -го продукта запишем в виде

$$v_i(t) = w_i(t) + x_i(t) + h_i(t). \quad (16.13)$$

Согласно (16.13) произведенный продукт  $v_i$  расходуется на потребление с интенсивностью  $w_i$ , на воспроизводство с интенсивностью  $x_i$  и на увеличение производственных фондов с интенсивностью  $h_i$  ( $h_i = \sum_j h_{ij}$ ,  $j = 1, m$ ).

Если принять линейную модель, то расход  $x_{ij}$  продукции вида  $i$  в  $j$ -ом производстве пропорционален выпуску  $j$ -ой продукции, так что

$$x_{ij} = \sum_j x_{ij} = \sum_j a_{ij} v_j, \quad j = 1, m. \quad (16.14)$$

Для того, чтобы увязать расход продукта на увеличение производственных фондов с ростом выпуска продукции, необходимо объединить два процесса: процесс образования производственного фонда и процесс его расходования. Рассмотрим приращение производственного фонда  $dH_i(t)$  за малый интервал времени  $\delta t$ . Это приращение пропорционально интенсивности накопления  $h_i(t)$  и интервалу времени  $\delta t$ :

$$dH_i(t) = c_i h_i(t) \delta t. \quad (16.15)$$

Расходование производственных фондов должно быть равно приращению производственного фонда:

$$dH_j(t) = dR_j(t) = r_{ij}dv_j(t), \quad (16.16)$$

где  $r_{ij}$  — коэффициент затрат  $i$ -го ресурса на производство  $j$ -го продукта.

Тогда, сопоставляя (16.15) и (16.16), находим

$$c_j dv_j(t) dt = r_{ij} dv_j(t),$$

откуда

$$h_j(t) = k_{ij} dv_j(t) / dt,$$

где  $k_{ij} = r_{ij} / c_j$  — коэффициент удельных капиталовложений, называемый также коэффициентом капиталоемкости.

С учетом (16.14) и (16.15) уравнение баланса (16.13) примет вид

$$\dot{v}_i(t) - \sum_j a_{ij} v_j(t) - \sum_j k_{ij} dv_j(t) / dt = w_i(t), \quad i = 1, n. \quad (16.17)$$

При решении полученной системы должны быть дополнительно учтены ограничения на трудовые ресурсы и ресурсы оборования, а также условия неотрицательности переменных. Однако останавливаться на методах решения данной системы уравнений мы не будем.

Рассмотренные выше задачи являются достаточно известными и характерными примерами динамического моделирования и даны в некоторой степени содержат прецеденты различных систем. Так, в модели "хищники—жертвы" под развитием системы понимается изменение во времени одной или другой из сосуществующих популяций. В качестве результата исследования, выполняемого на такой модели, может выступать факт гибели (выживания) одной из популяций или соотношение характеристик, при которых обеспечивается их совместное существование. Моделям личностерского типа отвечает еще менее содержательный системный результат, так как заранее определено, что одна из сторон безусловно должна выиграть противоборство, а другая проиграть. Более содержательными в смысле моделирования процессов развития являются экономические модели. Направленные созданию динамических моделей макроэкономики для прогноза возможного развития ситуации в отрасли, регионе или стране традиционно разрабатывается во многих странах. Рассмотренная выше многопродуктовая модель

представляет собой одну из наиболее простых задач этого класса, но уже в ней присутствует значительное число параметров, влияющих на решение и характеризующих различные стороны промышленного производства. В качестве результата исследований, которые можно проводить с помощью многопродуктовой модели, выступает сам процесс промышленного производства на весь прогнозируемый период.

Многими отличительными чертами рассмотренных выше моделей обладает задача моделирования жизненного цикла кораблей одного класса нескольких поколений. При исследовательском проектировании, в процессе которого выполняется военно-экономический анализ проектируемых кораблей, рассматриваются две основные группы показателей: показатели боевой эффективности корабля и ресурсные показатели. Применительно к моделям разнородных систем эти показатели должны строиться с учетом боевой эффективности и затрат на содержание уже построенных и находящихся в составе флота кораблей. В общем случае учет этих факторов должен охватывать все корабли и суда ВМФ. Однако при такой постановке вычленим единичные влывание того или иного проектного решения на общую картину функционирования флота вряд ли удастся в силу высокой степени редукции модели проектируемого корабля, включаемой в системную модель. В связи с этим обычно в первом приближении предполагается, что развитие классов кораблей идет независимо друг от друга.

Поскольку боевая эффективность вновь создаваемого корабля (серии кораблей) определяется методами, известными из теории боевой эффективности, то в данном разделе можно считать эту величину известной. Существенным становится изменение этой величины с течением времени в результате морального и физического старения корабля, его оружия и вооружения. Для определения функции изменения боевой эффективности корабля во времени (функции старения) необходимо задать закон изменения показателя эффективности и определить его параметры. Принимая в модели экспоненциальный закон старения, следует потребовать выполнения следующих начальных и граничных условий:

$$E_{in}(0) = 1, E_{in}(T_{in}) = E_{out}, E_{in}(t) = 0 \text{ для очень больших } t, \quad (16.18)$$

где  $b_{in}$  — функция старения;  $T_{in}$  — срок службы корабля;  $E_{out}$  — значение боевой эффективности корабля на момент вывода его из состава флота.

Условным (16.18) отвечает функция

$$E_{in} = \exp(-A_{in}t), \quad (16.19)$$

где  $A_{in} = -\log(b_{in})/T_{in}$ .

Так как модель развивающейся системы описывается в терминах динамической задачи, то, как уже отмечалось, ее характерным атрибутом становится понятие состояния. В данной модели будем различать следующие характерные состояния:

- строительство кораблей;
- нахождение в боевой готовности;
- выполнение ремонтных и модернизационных работ;
- вывод кораблей из состава флота.

Для определения темпов строительства вводится понятие производственных возможностей производства —  $T_{in}$  [ед./год]. При этом считается, что величина  $T_{in}$  обратно пропорциональна количеству кораблей:

$$T_{in} = W_{in}/D_{in}, \quad (16.20)$$

где  $W_{in}$  — удельные возможности производства [шт./год].

Снижение боевой эффективности в результате старения корабля происходит пропорционально выражению (16.19), а в результате выполнения модернизационных работ она восстанавливается на некоторую процентную величину ( $K_{mod}$ ).

Определение стоимости создания  $n$ -го корабля серии выполняется по формуле [81]:

$$C_{in} = D_{in}(1 - C_{in} + C_{mod}), \quad (16.21)$$

где  $n = [1, N]$ , а  $C_{in}$  — коэффициент освоения производства ( $C_{in} \in [0,1]$ ).

Затраты на эксплуатацию, модернизацию и утилизацию принимаются линейными с учетом инфляции.

Моделирование жизненного цикла выполняется применительно к кораблям одного класса, участвующим в решении двух

базовых задач с начальными эффективностями  $E_1$  и  $E_2$  соответственно. Результаты решения данной задачи показаны на рис. 16.7.

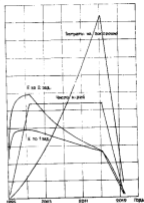


Рис. 16.7

На рис. 16.7 изображены графики, отмечающие наиболее простому случаю: новое строительство одного поколения кораблей, модернизация которых в течение срока службы не предусматривается. При введении в рассмотрение двух поколений (рис. 16.8) законы изменения количественного состава флота и его эффективности усложняются. Наиболее же информативным является случай сочетания нескольких поколений кораблей, для которых предусматривается до двух модернизаций (рис. 16.9–16.11).



Результатами исследований, проводимых на приведенной модели, могут быть анализ уровней боевой эффективности и затрат на содержание кораблей рассматриваемого класса, определение степени равномерности распределения этих величин в течение прогнозируемого периода времени и определение оптимальных значений моделируемых параметров.

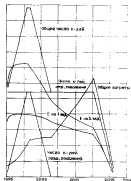


Рис. 16.8

Помимо указанных задач в проблеме балансирования сил в среде ВМФ важное место занимает задача обоснования типов (классов) боевых кораблей и вспомогательных судов (задача таксономии). Одни из подходов к ее решению можно найти в [147].

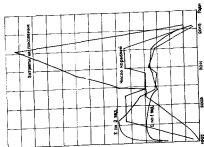


Рис. 16.9

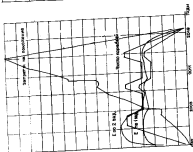


Рис. 16.10



Рис. 16.11

#### 16.4. ПРИНЦИПЫ И ПОДХОДЫ К ФОРМИРОВАНИЮ ПРОГРАММ ВОЕННОГО КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ

По мере совершенствования политических и экономических механизмов управления народным хозяйством все в большей степени актуальными становятся вопросы программного планирования на государственном уровне. Долгосрочное планирование особенно важно в тех областях государственной деятельности, в которых для реализации намеченного плана требуется привлечение значительных средств на протяжении длительного времени. При этом, как правило, в разработке проекта участвует большое количество организаций, деятельность которых требует согласованного управления. В наибольшей степени описанным

условиям отвечает военное кораблестроение. Действительно, сегодня создание крупного военного корабля требует значительных финансовых средств, сроки — от выдачи задания на проектирование до сдачи головного корабля флоту, могут достигать десяти и более лет, а в его создании принимает участие несколько сот различных предприятий. Поэтому естественно, что военное кораблестроение является той отраслью, в которой вопрос о внедрении практики программного планирования должен быть поставлен в первую очередь.

Программное планирование крупномасштабных задач впервые начали применять еще на рубеже 30-х годов, в том числе и в нашей стране [158]. Практическая потребность в этой работе была обусловлена резко возросшими в результате технической революции альтернативными возможностями промышленного производства, длительными сроками реализации крупномасштабных проектов и их огромной стоимостью. Позднее математический и методический аппарат, обеспечивающий моделирование задач программного планирования, постоянно развивался, и сегодня основу его составляют методы динамического моделирования, теория оптимизации и системный анализ [168, 253, 305]. В целом, задача программного планирования представляет собой одну из задач теории принятия решений. Однако по сравнению с общей постановкой при ее решении возникает ряд существенных особенностей, позволяющих выделить программное планирование в самостоятельный подкласс задач принятия решений.

Первой, которая будет здесь рассмотрена, и, возможно, наиболее характерной особенностью задач программного планирования является высокая степень связности объекта планирования с элементами подсистем более высокого и более низкого уровней иерархии. Эта особенность присуща любой крупномасштабной задаче, и, конечно, в полной мере проявляется себя при формировании программы военного кораблестроения. При этом, под объектом планирования понимается совокупность создаваемых за планируемый период кораблей, т. е. те корабли, которые на различных этапах создания вошли в программу кораблестроения. Из самого определения крупномасштабности моделирова-

ния объекта вытекает его сильная зависимость от деятельности других объектов государственного уровня и, прежде всего, структуры государственного бюджета и промышленной базы страны. Доля бюджета или национального валового продукта, выделяемая на создание корабельного состава военного флота, определяется как сложная часть доли оборонного бюджета страны, выделяемой на Военно-Морской Флот в целом и состоящей из средств на содержание, в том числе боевую подготовку и эксплуатацию кораблей, развитие инфраструктуры и базирования флота и собственно строительство нового корабельного состава. При определении доли бюджета, которую целесообразно выделить на военное кораблестроение, как правило, не удается построить оптимизационную или подобную ей математическую модель. Основой для балансирования составляющих на уровне государственного бюджета обычно являются результаты макроэкономического анализа близких аналогов (иностранных государств или собственной опыт на различных исторических промежутках времени) и презентат прошедшего планового периода с введением соответствующих актуальных корректив. Невозможность более строгой постановки задачи прежде всего связана с высокой степенью политизации решений на этом уровне и их бойкой конъюнктуризацией.

Как уже отмечалось, к созданию довременного боевого корабля привлекаются сотни предприятий, начиная от судостроительного завода и проектно-конструкторского бюро, и кончая самыми удаленными предприятиями — поставщиками комплектующего оборудования. Эти предприятия, помимо выполнения поставок комплектующих изделий для строящихся кораблей, ведут также производство в интересах других заказчиков, возможно не связанных с Военно-Морским Флотом. Причем, чем меньше доля участия этих предприятий в процессе создания корабля, тем в меньшей степени они управляемы в рамках разрабатываемой программы. В то же время, чем в меньшей степени определяющим является вклад комплектующего изделия в строительство корабля, тем проще организовать его производство на аддитивном предприятии. Поэтому при определении уровня связности программы военного кораблестроения всегда

будет существовать задача определения оптимального круга предприятий, деятельность которых должна быть учтена при программном планировании. При этом, в первом приближении всегда можно ограничиться рассмотрением судостроительных заводов и конструкторских бюро — проектантов кораблей.

Помимо элементов структуры государственного бюджета и производственной базы, при формировании программы военного кораблестроения необходимо также учитывать складывающуюся в результате ее осуществления систему сил Военно-Морского Флота. Очевидно, что не применив в процедуре оценки качества разрабатываемой программы таких категорий, как боевая эффективность сил ВМФ, мы не можем рассчитывать на всестороннюю доказательность предлагаемых программных решений. Модель совокупной оценки эффективности функционирования системы сил Военно-Морского Флота является еще одним объектом более высокого уровня по сравнению с программой кораблестроения, взаимосвязь с которым должна быть учтена при ее разработке.

В качестве объектов смежности программы более широкого уровня рассматриваются основные комплексы оружия, вооружения и технические средства, устанавливаемые на кораблях программы, и соответствующие программы развития этих комплексов. При этом возникают как самостоятельные задачи программного планирования разработки и создания комплексов каждого вида и задача сопряжения этих программ с программой военного кораблестроения. Степень увязки программ вооружения (технических средств) с программой военного кораблестроения также имеет определенный optimum. Безусловная оптимизация процессов развития оружия, вооружения и технических средств в интересах кораблей нанесет ущерб таким проблемным вопросам, как унификация с другими типами носителей, согласованность с береговыми средствами обеспечения, сопрягаемость с системами обмена информацией и т. п. Кроме того, сами программы развития вооружений поднимают свои собственные законы развития, определяющими являются параметры, рандомность и другие ключевые моменты плана. С другой стороны, только достаточно жесткое согласование программ вооружений

с программой кораблестроения позволяет построить относительно стройную и непротиворечивую систему, отвечающую тем требованиям, о которых только что говорилось, но уже применительно к программе кораблестроения.

Наряду с такой важнейшей особенностью программного планирования, как связность, при формировании программы военного кораблестроения необходимо учитывать также многоаспектность задач этого класса. Непустынно можно сказать, что с увеличением масштабности модели выбора должно расти количество факторов, которые необходимо учесть при построении эффективного плана. В то же время, с увеличением сложности системы, очевидно растет количество аспектов ее проявления. И первое, и второе отмеченные обстоятельства ставят проблему многоаспектного описания задачи.

Обычно в теории принятия решений проблема многоаспектности рассматривается исключительно с точки зрения механизма выбора. При этом основные пути ее решения связываются с переходом либо к многокритериальной задаче оптимизации, либо к задаче искусственного интеллекта. И тот, и другой подходы находят свое место в задаче программного планирования, однако проблема многоаспектности в крупномасштабных задачах имеет и иное выражение.

В разделе II нами было показано, что в многоаспектных моделях входящие в оптимизационную задачу характеристики внешней среды и переменные модели подтверждаются агрегированно. Очевидно, что с ростом масштабности задачи этот эффект будет нарастать. Так, например, для такой задачи относительно крупного масштаба, как планирование производства в определенной отрасли, построить модель, чувствительную к конкретным техническим параметрам производства или характеристикам произвольных изделий, не удается. Они заменяются на более обобщенные показатели (агрегаты), а получаемые при этом решения приобретают количественно-качественный характер. В то же время, конечной целью программного планирования является не выведение некоторых общих закономерностей, характерных скорее для теоретических исследований, а получение количественного результата, который можно было бы использовать в

практической деятельности. При формировании программы военного кораблестроения описанное противоречие приобретает еще более устойчивый характер и выдвигается в самостоятельную проблему создания единого инструмента программного планирования.

Выделение в качестве основных таких особенностей программного планирования крупномасштабных задач, как большая связность смежных иерархических уровней и высокая степень агрегированности переменных моделирования позволяет приступить к описанию основных принципов построения задачи формирования программы военного кораблестроения как единой информационной системы.

Основной задачей системного подхода является определение системы как объекта исследования. Для обеспечения иерархической связности задачи в качестве такой системы необходимо рассматривать по меньшей мере совокупность трех групп объектов. Это корабли, проектирование и строительство которых предусматривается программой, операции и другие действия флота, в которых будут участвовать будущие корабли, и предприятия промышленности, обеспечивающие создание этих кораблей. Кроме того, важное место в задаче занимает модель Военно-Морского Флота как развивающейся системы, включающая наряду с ранее построенным корабельным составом и другими силами флота, корабли разрабатываемой программы. В этом смысле ВМФ также может рассматриваться в качестве объекта моделирования.

При несомненной важности всех введенных в рассмотрение объектов, основным по определению самой задачи, и следовательно, и наиболее информационно обеспеченным является совокупность кораблей программы. В то же время, учитывая высокую степень агрегированности модели, не представляется возможным формировать функциональную модель даже этого объекта. Поэтому вместо функционально связанных модельных зависимостей в задачах программного планирования используются готовые результаты проектных проработок, выполненных на предварительных этапах исследований на альтернативной основе. Поскольку информация о каждом отдельном корабле

может носить количественный и качественный характер, данные о создаваемых кораблях разбиваются на преимущественно качественные и количественные, и это деление сохраняется применительно ко всем остальным объектам моделирования, обеспечивая тем самым определенную однородность информационного протокола. Насыщение базы данных отдельного корабля полностью определяется потребностями в информации об этом корабле остальных объектов модели, а также тех алгоритмов, которые обеспечивают получение результатов программного планирования. Очевидно и обратное. Так, например, для создания перечня кораблей и решаемых ими боевых задач на уровне операций флота (здесь и далее под операциями понимаются любые боевые действия сил флота) необходимо сформулировать цели операций и перечни участвующих в них кораблей. Такие же параметры, как трудоемкость создания корабля, его боевые возможности и сроки нахождения в составе флота используются в расчетных алгоритмах модели. В завершение этого вопроса можно отметить, что база данных каждого объекта моделирования, помимо деления на количественную и качественную части, также делится на информацию о самом объекте и той среде, в которой он функционирует. При этом, поскольку в соответствии с принципами системного подхода с большей степенью подробности описывается сам объект и именно этим свойством обладает количественная информация, естественно предположить, что в протоколе данных постоянно будет осуществляться деление на количественную информацию об объекте и качественное описание среды его функционирования. Такое деление позволяет внести дополнительное упорядочение в информационное описание модели и повысить уровень структурированности задачи.

Несмотря на несомненную важность введенных в рассмотренные классы объектов моделирования и условий их информационного описания, для постановки задачи формирования программы военного кораблестроения этого еще недостаточно. Поскольку задачи программного планирования относятся к классу задач принятия решения, то не ответив на вопрос о том, как отражаются описанные выше особенности задачи на механизме выбора, нельзя считать постановку задачи вполне войной.

Важным фрагментом формирования программы военного кораблестроения как задачи программного планирования является оценка боевой эффективности флота, корабельный состав которого включает корабли, предусмотренные одним из вариантов программы. Для того, чтобы такая оценка обладала достаточной степенью адекватности, она должна выполняться в системе сил всего Военно-Морского Флота как развивающейся системы, т. е. с учетом плавающего корабельного состава, иных сил и средств флота и взаимодействующих с ним видов и родов войск, а также существующей инфраструктуры. Как уже отмечалось, попытка построения такой крупномасштабной модели неизбежно приведет ее в класс количественно-качественных и не позволит получить необходимую точность при решении практических задач. Вместе с тем, только целостное представление о процессах, происходящих во флоте, с учетом всех существенных факторов может дать объективную оценку формируемому плану. Для разрешения указанного противоречия используется подход, позволяющий при формировании программы разделить количественно-качественные военно-экономические оценки, включающие интегральные эффективностьные характеристики и совокупные (в том числе трудноисчисляемые косвенные) затраты, необходимые для реализации этой эффективности, и технические, технологические, производственные и стоимостные показатели, несущие исключительно количественный характер и придающие предполагаемому плану практическую ценность.

Формирование военно-экономических оценок происходит на основе теории и методов военно-экономического анализа, центральное место в котором занимает понятие критерия типа "стоимость—эффективность" (см. п. 14.2). Этот тип критериев представляет собой комбинацию ресурсных показателей и показателей боевой эффективности. С его помощью реализуется оптимизация характеристик системы, в качестве которой в данном случае выступает программа военного кораблестроения.

Для построения и вычисления показателя боевой эффективности необходимо выполнить формализацию такого понятия, как эффективность программы. Если рассматривать его с точки зрения боевой эффективности кораблей, участвующих в пре-

грамме, и не применять непосредственно к самой программе, как в некоторой самостоятельной операции, что привело бы к постановке новой, хотя безусловно и содержательной задачи, то тогда понятие боевой эффективности программы будет значительно уже понятия боевой эффективности флота в целом. Это обстоятельство вносит определенную сложность в построение показателя эффективности, так как с одной стороны оценка эффективности только кораблей программы не дает прямого ответа на вопрос о полезности ее реализации для флота, а с другой — рассмотрение боевой эффективности совместно строящихся и находящихся в строю кораблей, а также других сил и средств флота (по сути рассмотрение флота как разнородной системы) существенно снижает критичность выполняемых оценок программы. Это снижение обуславливается тем, что при рассмотрении на флоте в среднем трех поколений кораблей и с учетом эффективности других сил и средств флота доля вклада кораблей программы не будет носить определяющего характера. Относительную сложность можно устранить с помощью введенного принципа разделения. В тех фрагментах модельного комплекса, где происходит выработка количественной информации в виде числа кораблей, находящихся в составе флота и других подобных характеристик, учитывается весь корабельный состав флота на каждый прогнозируемый момент времени, а при формировании количественно-качественных оценок боевой эффективности вводится предположение о том, что весь флот состоит из кораблей, построенных по замыслу предлагаемой программы. Иными словами, выполняется оценка боевой эффективности такого корабельного состава флота, который мог быть построен, если бы предлагаемый вариант программы исполнился многократно в течение времени, необходимого для достижения равновесия между вступающими в строй и выводимыми из состава флота кораблями этой программы. Другие силы и средства флота могли бы учитываться в этой оценке на уровне исходных данных.

При разработке структуры математической модели, реализующей предлагаемый подход, на первый взгляд может показаться, что наиболее подходящим инструментом для количе-

ственно-качественной оценки боевой эффективности корабельного состава флота является имитационное моделирование [197]. Такая точка зрения может основываться на том, что рассматриваемая задача представляет собой многоэлементную иерархическую систему, функционирующую в соответствии с большим числом многостатных сигналов боевых действий. Однако более внимательный анализ особенностей задачи показывает, что с отказом от необходимости адекватного количественного оценивания (в соответствии с предлагаемым принципом) главной особенностью модели оценки боевой эффективности становится "прозрачность" и относительная простота составляющих ее элементов. Этим требованиям в более полной степени отвечает так называемая "квазирегулярная" модель [108].

Ресурсыные показатели и в более содержательных моделях обычно рассматриваются не сложнее, чем линейные функции оптимизируемых параметров [42]. Специфической особенностью программных задач будет лишь то, что эти оценки должны быть чувствительны к таким системным характеристикам, как объем серии кораблей, индекс цен, затраты на эксплуатацию, модернизацию и обновление корабельного состава и, возможно, некоторые другие.

В целом, оптимизационная задача строится на основе оценок эффективности сил флота при решении собственных ему задач и общих затрат на его эксплуатацию. При этом интегральная оценка предлагаемого программного плана может быть получена на основе теории многокритериальной оптимизации [137] с учетом единой пространственно-временной ситуации. Решение этой задачи составит количественно-качественную сторону результатов программного планирования.

Получение количественных оценок плана достигается за счет применения достаточно простых, но совершенно прозрачных расчетных алгоритмов, использующих достоверные (оперативные) исходные данные. К таким алгоритмам можно отнести определение средних ожидаемых сроков сдачи кораблей в зависимости от возможностей производства и трудоемкости (стоимости) создания кораблей, планируемого периода времени их строительства, исходя из потребного объема серии, ожидаемого

числа кораблей флота в каждый прогнозируемый момент времени и некоторых других параметров плана. При этом, достоверность исходных данных обеспечивается представлением их установленным порядком контрольными органами и ответственными исполнителями (организациями), а также за счет собственных прогнозов экономических исследований и оперативного обновления информации.

Высокая степень агрегативности модели программного планирования и перенос ее центра тяжести с функциональных преобразований на исходные данные с целью повышения достоверности расчетов заставляет по иному взглянуть на сам механизм принятия решения на основе количественных оценок. Если, как это было отмечено выше, в случае количественно-качественных оценок рекомендуется использовать аппарат теории многокритериальной оптимизации, то в условиях значительно большей достоверности и практической ценности исходных данных при количественной оценке оправданность снижения адекватности рекомендуемого решения за счет применения механизма критериального выбора вызывает серьезные сомнения. Другим обстоятельством, ведущим к отказу от оптимизационных процедур при количественном оценивании плана, является то, что большая часть закладываемых в модель данных оказывается взаимосвязанной посредством мощных алгоритмов или по определенно задан. Так, задачи, решаемые флотом посредством в том числе сил, обозначенных в программе кораблестроения в виде создаваемых кораблей, должны быть указаны в характеристиках этих кораблей таким образом, чтобы обеспечить их представительность во всех операциях флота в соответствии с предлагаемым замыслом. С другой стороны, возможность создания кораблей, предусмотренных кораблестроительной программой, определяемая имеющейся судостроительной базой, а темп их сдачи через трудоемкость (стоимость) создания в свою очередь зависит от номенклатуры и содержания решаемых этими кораблями боевых задач. Если при этом иметь в виду, что число привлекаемых к операции кораблей всегда меньше, чем может быть построено из-за необходимости их технического обслуживания и проведения боевой подготовки, то

становится ясным, что вопрос согласования данных при программном планировании представляет собой большую самостоятельную задачу. При значительной размерности информационных полей, что практически всегда имеет место, в процессе согласования с большой вероятностью возникают противоречивые, а иногда и неразрешимые (туниковые) ситуации, ути от которых можно только путем изменения постановки задачи.

Отмеченные особенности задачи количественного оценивания плана обуславливают выдвинутые второго после разделения оценок принципы моделирования программы военного кораблестроения. Суть его заключается в отказе от оптимизационных процедур и отдалении предпочтения в качестве основного механизма выбора проверки всей действующей в задаче информации на непротиворечивость. С математической точки зрения это решение объясняется тем, что в реальной задаче программного планирования в силу большого числа противоречивых ограничений классической области допустимых решений не получается. Поэтому решение задачи идет путем организации диалога, реализующего итерационный процесс изменения исходных данных (постановки задачи) по результатам просмотра каждого альтернативного варианта плана. Первый или несколько последовательно получаемых допустимых решений принимаются как результат планирования. Таким образом, методом выбора становится последовательный подбор первого допустимого варианта плана. При этом, обоснованность получаемых решений обеспечивается полнотой учета и известным приоритетом всех факторов, существенно влияющих на качество плана. Этот второй выдвинутый принцип планирования формулируется как принцип непротиворечивости.

С учетом описанных особенностей и на основе сделанных оговорок и выдвинутых принципов открывается реальная перспектива разработки единого информационно связанного программного комплекса, обеспечивающего выполнение всех необходимых действий, направленных на формирование программы военного кораблестроения, и являющийся рабочим инструментом ее корректировки. Структура одного из возможных вариантов такого комплекса показана на рис. 16.12.



Рис. 16.12

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абчук В. А., Матвейчук Ф. А., Томашевский Л. П. Стратегия по исследованию операций. — М.: Воениздат, 1979.
2. Абчук В. А., Емельянов Л. А., Матвейчук Ф. А., Суздаль В. Г. Введение в теорию выработки решений. — М.: Воениздат, 1972.
3. Автоматизация полкового конструирования. 1-я всесоюзная конференция. Тезисы докладов. — Йошкар-Ола: Марийское книжное издательство, 1978.
4. Айзерман М. А., Алексеев Ф. Т. Выбор вариантов. Основы теории. — М.: Наука, 1990.
5. Акоф Р., Соскени М. Основы исследования операций. — М.: Наука, 1971.
6. Акоф Р., Эмера Ф. и др. О неустойчивых системах. — М.: Сов. радио, 1974.
7. Алгоритмы оптимизации проектных решений / Под ред. Половинкина А. И. — М.: Энергия, 1976.
8. Александров А. А. Стратегия по управлению кораблем. — М.: Воениздат, 1974.
9. Аюки М. Введение в методы оптимизации. Основы и приложения нелинейного программирования. — М.: Наука, 1977.
10. Арфиб М., Калмык Р., Фабб П. Основы по математической теории систем. — М.: Мир, 1971.
11. Арнольд В. И. Теория катастроф. — М.: Наука, 1990.
12. Азиз В. В. Проектирование судов. — Л.: Судостроение, 1985.
13. Базилевский С. А. Теория ошибок, возникающих при проектировании судов. — Л.: Судостроение, 1964.
14. Бэрдэжик А. И. Проектирование кораблей (основы методологии проектирования кораблей). — М.: Воениздат, 1954.
15. Баничук Н. В. Введение в оптимизацию конструкций. — М.: Наука, 1986.
16. Белакин Н. И. Анализация корабля. — М.: Патент, 1990.
17. Беллман Р. Динамическое программирование. — М.: Иностранная литература, 1960.
18. Беллман Р., Калала Р. Динамическое программирование и современная теория процессов управления. — М.: Иностранная литература, 1962.
19. Беллман Р., Задс Л. А. Применение решений в выпуклых условиях. — М.: Мир, 1976.



20. Банашич Р., Ларичев О. Н., Монгольды Ж. Терми Ж. Логическое программирование при многих критериях: метод ограничений. — М.: Автоматика и телемеханика № 8, 1971.
21. Березовский Б. А., Трапкин С. И. О распределении числа элементов множества Парето. — В кн.: Вопросы кибернетики. — Ташкент: Труды Института кибернетики и ВИ АН УССР, вып. № 83, 1975.
22. Березовский Б. А., Борзаковский В. И., Кеннер Л. М. Взаимные отношения в многокритериальной оптимизации. — М.: Наука, 1981.
23. Березовский Б. А., Гнеденко А. В. Задача наилучшего выбора. — М.: Наука, 1984.
24. Березовский В. В. Необходимые условия экстремума в выпуклой задаче максимума на симплексах множеств. — М.: Кибернетика № 2, 1972.
25. Берзин Е. А. Оптимальное распределение ресурсов и теория игр. — М.: 1983.
26. Bertalanffy L. An outline of general systems theory. — British J. for Phil of Sci., № 2, 1950.
27. Бертулашвили Л. Общая теория систем: критический обзор. — В кн.: Исследования по общей теории систем. — М.: Прогресс, 1969.
28. Бешелев С. Д., Гуревич Ф. Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. — М.: Статистика, 1980.
29. Благовещенский С. Н., Холодильни А. Н. Справочник по статике корабля. — Л.: Судостроение, 1976.
30. Благовещенский С. Н., Холодильни А. Н. Справочник по динамике корабля. — Л.: Судостроение, 1977.
31. Блауберг Н. В. и др. Системный подход. Природоведение, проблемы, трудности. — М.: Знание, 1968.
32. Блауберг Н. В., Садовский В. Н., Юдин Э. Г. Системный подход в современной науке. — В кн.: Проблемы методологии системного исследования. — М.: Мысль, 1970.
33. Блауберг Н. В., Юдин Э. Г. Становление и сущность системного подхода. — М.: Наука, 1973.
34. Блякун Д. Гарини М. Теория игр и статистических решений. — М.: Восточная литература, 1938.
35. Богданов А. А. Всеобщая организационная наука (тектология). — М.: Книга, 1903.
36. Бокленский К. П. Курс проектирования судов. — СПб.: Политехнический институт, 1904.
37. Болтянский В. Г. Математические методы оптимального управления. — М.: Наука, 1969.
38. Борзаковский В. И. Проблемы векторной оптимизации. — В кн.: Исследования операций. Методологические аспекты. — М.: Наука, 1972.
39. Братко Н. Программирование на языке Пролог для искусственного интеллекта. — М.: Мир, 1990.
40. Брэдфорд Т. Р. Многокритериальность и выбор альтернативы в политике. — М.: Радио и связь, 1984.
41. Бреслав Л. Б. Технико-экономические обоснование средств основан на первом аспекте. — Л.: Судостроение, 1982.
42. Бреслав Л. Б. Экономические модели в судостроительном проектировании. — Л.: Судостроение, 1984.
43. Бреслав Л. М. Системное планирование и управление в судостроении. — Л.: Судостроение, 1987.
44. Бронников А. В. Морские транспортные суда. — Л.: Судостроение, 1984.
45. Брусков В. С., Баранов С. К. Оптимальное проектирование логистических аппаратов. Многоцелевой подход. — М.: Машиностроение, 1989.
46. Буфонов И. Г. Избранные труды / Под ред. акад. Ю. А. Шиманского. — Л.: Судостроение, 1956.
47. Буфонов И. Г. Об одном методе определения главных размерений судна. — СПб.: Вакгодемский центр морской инженерии, т. 1, 1916.
48. Бунге М. д-р. Интуитивная наука. — М.: Прогресс, 1967.
49. Буселенко П. П. и др. Лекции по теории сложных систем. — М.: Сов. радио, 1973.
50. Быков В. П. Методические обоснование САПР в машиностроении. — Л.: Машиностроение, 1989.
51. Ваганов А. М., Карпов А. В. Общее устройство судов. — Л.: Судостроение, 1983.
52. Ваганов А. М. Проектирование скоростных судов. — Л.: Судостроение, 1978.
53. Вагнер Г. Основы исследования операций (т. 1—3). — М.: Мир, 1971.
54. Валуев С. А. и др. Системный анализ в экономике и организации производства. — Л.: Политехника, 1991.
55. Васильев А. Л. Стандартизация в судостроении. — Л.: Судостроение, 1978.
56. Венцель Е. С. Теория вероятностей. — М.: Физматлит, 1960.
57. Венцель Е. С. Исследования операций. — М.: Сов. радио, 1972.
58. Вилкас Э. Я. Многоцелевая оптимизация. — В кн.: Математические методы в оптимальных науках, вып. 7. — Вильнюс, 1976.
59. Вилкас Э. Я. Аксиоматический подход к принципам оптимизации. — В кн.: Современное состояние теории исследования операций. — М.: Наука, 1979.
60. Вилкас Э. Я., Майминас Е. Э. Решение теории информации, моделирование. — М.: Радио и связь, 1981.
61. Вильсон А. Дж. Эвристические методы моделирования сложных систем. — М.: Наука, 1978.
62. Винер Н. Кибернетика. — М.: Сов. радио, 1953.
63. Варьяновский Э. Я., Панасовский И. М. Стратегия проектирования систем управления. — Л.: Судостроение, 1978.
64. Вейткусский Я. И. Сопротивляемость движению судов. — Л.: Судостроение, 1988.

65. Волгин Л. П. Проблема оптимальности в теоретической кибернетике. — М.: Сов. радио, 1968.
66. Волгин Л. П. Принцип согласованного стимула. — М.: Сов. радио, 1977.
67. Волгин Н. С. и др. Прикладная теория исследования операций (I, II, III). — Л.: ВМА, 1973, 1976.
68. Волгин Н. С. и др. Исследование операций. — Л.: ВМА, 1981.
69. Волгин Н. С. и др. Математическое обеспечение управления. — Л.: ВМА, 1984.
70. Волгин Н. С. Применение методов теории вероятностей в операционно-статистической области. — Л.: ВМА, 1988.
71. Волкович В. Л. Многокритериальные задачи и методы их решения. — В кн.: Кибернетика и вычислительная техника вып. 1. — Киев: 1969.
72. Волкович В. Л. Методы и алгоритмы автоматизированного проектирования сложных систем управления. — Киев: 1984.
73. Волынский В. И. Применение метода Крамера для выделения части множества Парето при многокритериальной оптимизации. — М.: Автоматика и телемеханика № 12, 1982.
74. Вольтерра В. Математическая теория борьбы за существование. — М.: Наука, 1976.
75. Вопросы анализа в процедурах принятия решений / Сб. переводов. — М.: Мир, 1976.
76. Вунн Г. Теория систем. — М.: Сов. радио, 1978.
77. Вучков И., Велджера Л., Солажов Е. Прикладный линейный регрессионный анализ. — М.: Физматлит, 1987.
78. Вычислительные методы выбора оптимальных проектных решений / Под ред. В. С. Миталевича. — Киев: Наукова думка, 1977.
79. Вьюженико Н. П., Маслов Б. Н., Скугарев В. Д. / Под ред. С. Г. Гершковца / Военно-Морской Флот: роль, перспективы развития, использование. — М.: Военное издательство, 1988.
80. Галле-Рапортот М. Г. Кибернетика и теория систем. — В кн.: Системные исследования, сборник. — М.: Наука, 1973.
81. Гамидов Р. Г. и др. Формальные решения в задачах многокритериальной оптимизации. — Баку: Изд. АН АССР № 7, 1978.
82. Ганин М. П. Прикладные методы теории вероятностей. — Л.: ВМА, 1984.
83. Гаррет Р., Лондон Дж. Основы анализа операций на море. — М.: Воениздат, 1974.
84. Гафт М. Г. и др. Метод принятия решений о выборе наиболее предпочтительных параметров проекта сложной системы. — Автоматика и телемеханика № 6, 1973.
85. Гафт М. Г. Принятие решений при многих критериях. — М.: Знание, серия: Математика, кибернетика № 7, 1979.
86. Гейман В. Л., Ереш Н. Л., Мескален Э. С. Системы распознавания автоматизированных производств. — Л.: Машиностроение, 1988.
87. Гермейер Ю. Б. Введение в теорию исследования операций. — М.: Физматлит, 1971.
88. Гермейер Ю. Б. О сверхлинии векторных критериев эффективности в средней критерий при наличии неопределенности в параметрах эффективности. — В кн.: Кибернетика — на службу коммунизму. — М.: Энергия, 1971.
89. Гермейер Ю. Б. Обращение целей в задачах с векторными критериями. — М.: Техмашская кибернетика № 4, 1976.
90. Гейнров Р. Н. Краткий справочник конструктора. — Л.: Машиностроение, 1984.
91. Гейт Джей Ван. Прикладная общая теория систем (2 т.). — М.: Мир, 1981.
92. Гилл Ф., Миррей У., Райт М. Практическая оптимизация. — М.: Мир, 1983.
93. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф. — М.: Мир, 1984.
94. Гиро В. В., Русецкий А. А., Нещадимас Ю. А. Испытание моральной выносливости судов. — Л.: Судостроение, 1977.
95. Глобальный В. Г. Инженерное проектирование. — М.: Энергоиздат, 1982.
96. Гроденко Б. В. Курс теории вероятностей. — М.: Физматлит, 1981.
97. Гроденко Б. В., Коваленко И. Н. Введение в теорию массового обслуживания. — М.: Наука, 1987.
98. Гродов Б. И., Мучник Л. Н. Машинная графика в автоматизированном проектировании судов с применением ЭВМ. — Л.: Судостроение, 1976.
99. Гордон Л. А. Расчет компоновки и основных размеров корабля. — Л.: Судостроение, 1956.
100. Горшков С. Г. Морская мощь государства. — М.: Воениздат, 1976.
101. Губанов В. А., Захаров В. В., Коваленко А. Н. Введение в системный анализ. — Л.: ЛИУ, 1988.
102. Гуд Г. Х., Макел Р. Э. и др. Системология. Введение в проектирование больших систем. — М.: Сов. радио, 1982.
103. Дабалган А. В., Заруба В. Об одной схеме организации проектирования сложных систем. Автоматизация проектного конструирования. 1-я всесоюзная конференция. — Подкор-Одн: 1978.
104. Дабалган А. В. Оптимальное проектирование машин и сложных устройств. — М.: Машиностроение, 1979.
105. Дворжанкин В. П., Подольников А. Н., Соболев А. Н. Методы системного планирования решений. — М.: Наука, 1977.
106. Дивилмер Т. К. Проектирование современного корабля. — Л.: Судостроение, 1984.
107. Джон Дж. К. Инженерное и художественное конструирование. Современный метод проектного анализа. — М.: Мир, 1976.
108. Динер Н. Я. Подсознание операций. — Л.: ВМА, 1969.

109. Директор С., Рорер Р. Выходы в теории систем. — М.: Мир, 1974.
110. Дитрих Я. Пространство и конструирование. Системный подход. — М.: Мир, 1981.
111. Дмитриев В. В. Прикладная теория информации. — М.: Высшая школа, 1989.
112. Дорин В. С. Влияние некоторых тактико-технических элементов на основные главные размеры и водоизмещение проектируемого корабля. — Л.: Судостроение № 6, 1953.
113. Дорин В. С., Пашин В. М., Солдатов В. В. Примененные экономико-математические методы на ЭВМ при проектировании судов. — Л.: Судостроение № 11, 1967.
114. Дорин В. С. Общие принципы построения системы автоматизированного проектирования судов. — Л.: Судостроение № 6, 1973.
115. Дориндентов Н. К. и др. Проектирование судов внутреннего плавания. — Л.: Судостроение, 1974.
116. Дранск Я. Н. Модели принятия решений в динамической двусторонней конкурентной системе. — М.: Автоматика и телемеханика № 1, 1982.
117. Драйвер Н., Смит Г. Прикладная регрессионный анализ (2-е изд.). — М.: Физматлит и статистика, 1987.
118. Дробленков В. Ф. и др. Стандартизация при создании кораблей и военно-морской техники. — М.: Морской сборник № 7, 1980.
119. Дробытко В. В., Щипилов В. В. Исследование операций и проблемы надежности в военном кораблестроении. — Л.: ВМА, 1977.
120. Дубок В. С. Основы экономики в судостроении. — Л.: Судостроение, 1973.
121. Дубок Ю. А. Условия оптимальности в динамических многокритериальных задачах. — М.: ВНИИ системных исследований, 1977.
122. Дубок Ю. А. Распределение ресурсов при многих критериях. — М.: Автоматика и телемеханика № 12, 1977.
123. Дубок Ю. А., Трапкин С. И., Якимов В. Н. Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем. — М.: Наука, 1986.
124. Дургарьян К. С. Об иерархической структуре сложной системы. — В кн.: Моделирование и управление в рассредоточенных системах. — М.: Наука, 1978.
125. Егер С. М. и др. Проектирование самолетов. — М.: Машиностроение, 1983.
126. Егер С. М., Лисейкин Н. К., Самойлов И. С. Основы автоматизированного проектирования самолетов. — М.: Машиностроение, 1986.
127. Емельянов С. В. и др. Модели и методы векторной оптимизации. — В кн.: Техническая избирательность. Новые науки и техника. — М.: ВИНТИ, 1973.
128. Емельянов С. В., Ларин О. Н. Многокритериальные методы принятия решений. — М.: Наука, серия: Математика, избирательность № 10, 1985.
129. Ермаков С. М., Михайлов Г. А. Статистическое моделирование. — М.: Наука, 1983.
130. Жуконин В. Л. Модели и процедуры принятия решений. — Тбилиси: Медиасреба, 1981.
131. Загайкович Д. Н. Общие устройство судна. — Л.: Судостроение, 1956.
132. Заде Л. А. Познание нечеткой логикой и его применение к принятию приближенных решений. — М.: Мир, 1976.
133. Зайцевский Н. А. Структуральные программы русского флота с 1881 по 1917 гг. — Л.: ВМАКВ, 1952.
134. Зангвилл У. Н. Векторные программирование. — М.: Сов. радио, 1973.
135. Зар К. А. Модели и методы построения компромиссных планов в задачах многокритериального программирования с нелинейными целевыми функциями. — Киев: Кибаристика № 4, 1971.
136. Захаров И. Г. Элементы теории принятия проектных решений при последовательном проектировании (судовладельцы). — Л.: ВМА, 1987.
137. Захаров И. Г. Теория компромиссных решений при проектировании корабля. — Л.: Судостроение, 1987.
138. Захаров И. Г. Теоретические основы и задачи системного анализа при последовательном проектировании кораблей ВМФ. — В кн.: Системный анализ при создании кораблей, комплексов вооружения и военной техники ВМФ (тематической сборник докладов постоянного действующего семинара). — Л.: ВМА, 1990.
139. Захаров И. Г. Современное состояние проблемы выбора при создании сложных технических систем. — В кн.: Системный анализ при создании кораблей, комплексов вооружения и военной техники ВМФ (тематической сборник докладов постоянного действующего семинара). — СПб.: ВМА, 1991.
140. Захаров И. Г. Теория принятия компромиссных решений при последовательном проектировании кораблей ВМФ (учебное пособие). — СПб.: ВМА, 1991.
141. Захаров И. Г. Методы системного анализа элементарных моделей (учебное пособие). — СПб.: ВМА, 1991.
142. Захаров И. Г. Определение главных элементов корабля при автоматизированном последовательном проектировании (учебное пособие). — СПб.: ВМА, 1991.
143. Захаров И. Г. Современное состояние теории проектирования кораблей Военно-Морского Флота. — В кн.: Материалы научно-технической конференции посвященной 120-летию со дня рождения Н. Г. Ефимова. — СПб.: ВМА, 1992.
144. Захаров И. Г. Методологии, теории и технологии разработки систем автоматизированного последовательного проектирования. — В кн.: Системный анализ при создании кораблей, комплексов вооружения и военной

теория ПМФ (теоретический сборник докладов постояннодействующего семинара). — СПб.: ВМА, 1992.

145. Захаров Н. Г. Методы формирования архитектурно-компоновочных решений корабля при исследовательском проектировании (учебное пособие). — СПб.: ВМА, 1992.

146. Захаров Н. Г. Особенности моделирования задач предметной области в интересах разработки системных моделей исследовательского проектирования (учебное пособие). — СПб.: ЦНИИ МО, 1993.

147. Захаров Н. Г. Особенности моделирования взаимосвязанных систем боевой задачи. — СПб.: ЦНИИ МО, 1993.

148. Зенкина А. А. Компьютерная композиция графика. — М.: Наука, 1990.

149. Знаменеровский Е. П., Попов Г. И. Определение размеров и ряда других главных элементов корабля при проектировании. — Л.: ВМАН, 1969.

150. Зудовичский С. И., Андреев Л. В. Личность и искусство проектирования. — М.: Наука, 1984.

151. Ибарра К. Факторный анализ. — М.: Статистика, 1980.

152. Ивченко Г. И., Каганов В. А., Коваленко Л. И. Теория массового обслуживания. — М.: Высшая школа, 1982.

153. Ивченко Г. И., Волков В. Д., Грушанский В. А. Эффективность проектирования элементов сложных систем. — М.: Высшая школа, 1982.

154. Исследования по общей теории систем / Сборник переводов под ред. В. И. Садовского, Э. Г. Радика. — М.: Прогресс, 1969.

155. Кавалеский В. С. Методы и модели неметрического многомерного проектирования. — М.: Автоматика и телемеханика № 8, 1977.

156. Каменецкий Е. Т. Быстрый способ определения параметров крупногабаритных судов. — Научные Труды НКВ, вып. 85, 1974.

157. Кавторонич Д. В. Математические методы организации и планирования производства. — Л.: ЛГУ, 1979.

158. Кавторонич Д. В. Математический расчет наилучшего использования ресурсов. — М.: Изд. АН СС СР, 1980.

159. Квинтани П. Л. Влияние современных научных идей на общество. — М.: Вопросы философии № 1, 1979.

160. Карлинг С. Математические методы в теории ир. программировании и экономике. — М.: Мир, 1964.

161. Кариничев Ф. П., Мухомов В. А. О векторных методах решения многоцелевых задач. — М.: Экономика и математические методы, вып. 2, 1978.

162. Квэйб Э. Анализ сложных систем. — М.: Сов. радио, 1969.

163. Квэйб Э. Методы системного анализа. — В кн.: Новые в теории и практике управления производством в США. — М.: Прогресс, 1971.

164. Кемпнер Л. М. О распределении метода неформальных альтернатив в одной модели многокритериальной оптимизации. — М.: Автоматика и телемеханика № 5, 1982.

165. Кестенбаум. Что такое системный подход? — Электроника № 9 (перевод), 1978.

166. Кинг Р. Л., Райфа К. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и компромиссы. — М.: Радио и связь, 1981.

167. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. — М.: Машиностроение, 1975.

168. Кларк Дж. Системология. Автоматизация сложных системных задач. — М.: Радио и связь, 1990.

169. Ковалев П. Н. Системное решение задачной неопределенности в дифференциальном исчислении. — Л.: Труды ЛКИ, 1975.

170. Колмогоров А. Н. Число коллизий при нескольких выстрелах и общие принципы оценки эффективности стрельбы. — М.: Труды МАН им. Стеклова № 12, 1945.

171. Комышев В. А., Косоруков А. И., Литвиненко В. А. Сравнение по проектированию судов с динамическими принципами поддержки. — Л.: Судостроение, 1990.

172. Компьютер, ирри, корабль. — Л.: Судостроение, 1981.

173. Компьютер и задачи выбора. — М.: Наука, 1983.

174. Конев Р. В., Максвелл В. Л., Миннер Л. В. Теория распылений. — М.: Наука, 1975.

175. Коротких В. М., Савенко Э. Ф., Комышев В. А. Динамика и верооятности. — М.: Воениздат, 1972.

176. Коротких В. М. Противоположная безопасность анимированной кораблей. — М.: Морской сборник № 9, 1976.

177. Коротких В. М. Алгоритм решения задачи многокритериальной оптимизации большой размерности. — М.: Автоматика и телемеханика № 2, 1983.

178. Коршунов Ю. М. Математические основы кибернетики. — М.: Энергия, 1985.

179. Кофман А. Методы и модели исследования операций. Пер. с фр. — М.: Мир, 1966.

180. Крапивин В. Ф. О теории живучести сложных систем. — М.: Наука, 1978.

181. Красненкер А. С. Об адекватном подходе к задаче принятия решений при нескольких критериях. — В кн.: Вопросы оптимального проектирования в производственных задачах. — Воронеж: ВГУ, 1972.

182. Краснов М. Л., Кослов А. П., Макаренко Г. И. Векторный анализ. — М.: Наука, 1978.

183. Краснощеков П. С. и др. Проектирование тепловых систем многоцелевого назначения. — М.: Теплотехника № 4, 1979.

184. Краснощеков П. С., Петров А. А. Принципы построения моделей. — М.: МГУ, 1983.

185. Кривцов А. М., Шеховцов В. В. Системы планирования и управления. — М.: Экономика, 1978.

186. Крылов А. Н. Об оценках представленных на конкурс проектов / Сб. трудов АН СССР. — М.: Изд. АН СССР, т. 1, ч. 1, 1951.
187. Крылов А. Н. Многокритериальная. — Л.: Судостроение, 1979.
188. Кузнецов А. А., Золотов А. А. Алгоритмы расчета эффективности многокритериальных транспортных систем. — М.: Машиностроение, 1982.
189. Кукушкин Н. С. и др. Конфликты и компромиссы. — М.: Наука, серия: Математика, конференция № 9, 1986.
190. Курлов Ж. Д., Семеновский Ж. К. САПР в судостроении. — М.: Мир, 1988.
191. Кусован Э. Искусственный интеллект. Применения в интегрированных производственных системах. — М.: Машиностроение, 1991.
192. Лазарев Н. А. Компьютерное проектирование сложных агрегатных систем. — М.: Радио и связь, 1988.
193. Лазарев В. Н., Юношева Н. В. Проектирование конструкций судного корпуса и основы прочности судов. — Л.: Судостроение, 1980.
194. Ланге Ф. Оптимизация решений. — М.: Прогресс, 1967.
195. Данкастер К. Математическая экономика. — М.: Сов. радио, 1972.
196. Лангер В. А. Основы проектирования морских коммерческих судов, ч. 1, 2. — М.: Гострансиздат, 1952—1953.
197. Ларичев О. Н. Методы многокритериальной оценки альтернатив. — В кн.: Многокритериальный выбор при решении слабоструктурированных проблем / Сб. трудов ВНИИ системных исследований, вып. 5. — М.: 1978.
198. Ларичев О. Н. Наука и искусство принятия решений. — М.: Наука, 1979.
199. Лебедев А. А. (под ред.) Основы систем летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1987.
200. Ливин Р., Дринг Д., Эдделсон Б. Практическое введение в теорию многокритериальной оптимизации и экстремальной системы с децентрацией на борту. — М.: Финансы и статистика, 1991.
201. Ливинин В. П. Выбор оптимальных решений в технико-экономических расчетах. — М.: Экономика, 1971.
202. Лисенчиков В. А. Теория и практика проектирования. — М.: Мир, 1972.
203. Лисенков С. П. Экономика судостроительной промышленности. — Л.: Судостроение, 1973.
204. Лоран П. Ж. Аппроксимация и оптимизация. — М.: Мир, 1975.
205. Лорьер Ж. Л. Системы искусственного интеллекта. — М.: Мир, 1986.
206. Лукоцкий А. П. Оценка уровня стандартизации судов. — Л.: Судостроение, 1977.
207. Лысенков Э. В. Методология оптимизации сложных программ. — В кн.: Проблемные вопросы проектирования кораблей. — Л.: ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова, 1982.
208. Лысенков Э. В. Критерий "эффективность—стоимость" и область его применения. — В кн.: Проблемные вопросы проектирования кораблей. — Л.: ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 1982.
209. Лысенков Э. В. Современная состояние методологии технико-экономического анализа. — М.: Судостроительная промышленность № 1, 1986.
210. Мазуров В. Д. Метод взвешенных в задаче оптимизации и классификации. — М.: Наука, 1990.
211. Мавлянов О. П. Метод исключительного проектирования борных кораблей малого и среднего водоизмещения. — Л.: Судостроение № 9, 1981.
212. Макаров И. М. и др. Теория выбора и принятия решений. — М.: Наука, 1987.
213. Макаров Ю. А. Организация проектирования в судостроении. — Л.: Судостроение, 1979.
214. Малецков Н. Я., Дорогоостайский Д. В., Притков Ю. А. Теория многокритериальности судов. — Л.: Судостроение, 1973.
215. Мангайм М. Л. Иерархическая структура. Модель процесса проектирования и планирования. — М.: Мир, 1970.
216. Маринин А. В., Бодягин А. А. К вопросу об определении параметров работоспособности надводных кораблей. — Л.: Вопросы судостроения, серия 1, 1973.
217. Математические методы оптимизации (учебное пособие). — Л.: ВМА, 1977.
218. Математические методы в теории систем. Сб. статей. — М.: Мир, 1979.
219. Матюк Дя. Ч. Теория и техника проектирования кораблей. — М.: Издательство МО СССР, 1960.
220. Мазурин Ю. К. Методы и модели векторной оптимизации. — М.: Наука, 1986.
221. Меленевский М. М. К использованию методов математической статистики при проектировании судов. — Л.: ЛКИ, 1966.
222. Меленевский М. М. Метод статистического прогноза (анализа). — Л.: Вопросы судостроения, серия: Математические методы, вып. 9, 1975.
223. Меркуряев М. М., Молдавский М. А. Исследования одного семейства задач в задаче векторной оптимизации. — В кн.: Автоматизированные и оптимальные проектирование (академической сборник). — Горький: ГИИВ, 1977.
224. Месарович М. Теория теории. — В кн.: Системные исследования (академический). — М.: Наука, 1970.
225. Месарович М., Такагара Н., Мако Д. Теория иерархических многокритериальных систем. — М.: Мир, 1973.
226. Месарович М., Такагара Н. Общая теория систем: математические основы. М.: Мир, 1978.

127. Методы выбора и оптимизации проектных решений. — В кн.: Методы выбора. — Горький: ГИИ, 1977.
128. Методы и модели согласования иерархических решений. — Новосибирск: Наука, СО АН СССР, 1978.
129. Методы поиска новых технических решений / Под ред. А. И. Полонкина). — Вольск-Од.: Марийское издательство, 1976.
130. Миротин Б. П., Жинкин В. К., Толыкин Г. П. Теория корабля. — Л.: Судостроение, 1980.
131. Михайлович В. С. Последовательные алгоритмы оптимизации и их применение, ч. 1. — Киев: Кибernetика № 1, 1965.
132. Михайлович В. С. Последовательные алгоритмы оптимизации и их применение, ч. 2. — Киев: Кибernetика № 2, 1965.
133. Михайлович В. С., Шкурба В. В. Последовательные схемы оптимизации в задачах упорядоченного выполнения работ. — Киев: Кибernetика № 2, 1966.
134. Михайлович В. С., Волков В. Л. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. — М.: Наука, 1982.
135. Многокритериальные задачи принятия решений / Под ред. Д. М. Гинзбург, С. В. Емельянова. — М.: Машиностроение, 1978.
136. Многокритериальные задачи принятия решений / Сб. статей под ред. Д. М. Гинзбург. — М.: ВНИИ системных исследований АН СССР, 1978.
137. Моисеев Н. Н. Элементы теории оптимальных систем. — М.: Наука, 1975.
138. Моисеев Н. Н. (под ред.) Оптимизация и исследование операций (образовательное пособие). — М.: Наука, 1979.
139. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа. — М.: Наука, 1981.
140. Моисеев Н. Н. Люди в кибернетике. — М.: Молодая гвардия, 1984.
141. Молдавский М. А. Метод решения непрерывных задач векторной оптимизации, не предполагающих существования у лица, принимающего решение, функции полезности. — В кн.: Автоматизированное конструктивное проектирование. — Горький: ГИИ, 1978.
142. Морс Ф., Кимбалл Д. Методы исследования операций. — М.: Сов. радио, 1962.
143. Мурр Ч. П. Надежность надводного корабля (2 ч.). — М.: Воениздат, 1983.
144. Мушкин Э., Мюллер П. Методы принятия технических решений, 1990.
145. Нагао М., Катаяма Т., Уэмура С. Структура и база данных. — М.: Мир, 1986.
146. Надежность технических систем / Сравнение под ред. А. И. Ушакова. — М.: Радио и связь, 1983.
147. Нахимов В. В. Теория эксперимента. — М.: Наука, 1971.
148. Нарубаки А. А. Введение в теорию обоснования проектных решений. — Л.: Судостроение, 1976.
149. Негодин К. Применение теории систем к проблемам управления. — М.: Мир, 1981.
150. Нейман фон Дж., Моргенштерн О. Теория игр и экономическое поведение. — М.: Наука, 1970.
151. Никитин В. А. Методика определения главных элементов корабля в предельном проекте. — Л.: Судостроение, 1967.
152. Никифоров А. С. Акустическое проектирование судовых конструкций. — Л.: Судостроение, 1990.
153. Николаев Дв. Динамика иерархических систем. Эволюционное представление. — М.: Мир, 1989.
154. Ногодин Л. М. Проектирование морской суды. — Л.: Судостроение, 1976.
155. Ноздрин В. В. Применение количественных методов теории эффективности в инженерном проектировании. — Л.: Труды ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова, 1969.
156. Обем Ж.-П., Эклид Н. Прикладной линейный анализ. — М.: Мир, 1988.
157. Овчаров Л. А. Прикладные задачи теории массового обслуживания. — М.: Мир, 1969.
158. Озерной В. М., Гафт М. Г. Построение решающих правил в многокритериальных задачах. — В кн.: Проблемы принятия решений. — М.: Институт проблем управления, 1974.
159. Окушев Ю. Б., Плотников В. Г. Принципы системного подхода к проектированию в технике связи. — М.: Связь, 1976.
160. Олтуфер С. А. Системный анализ для решения деловых и промышленных проблем. — М.: Сов. радио, 1969.
161. Основы систем систем летательных аппаратов / Под ред. А. А. Лебедева. — М.: Машиностроение, 1987.
162. Основы современной системологии / Перевод под ред. Е. К. Масловского. — М.: Мир, 1975.
163. Павленко В. Ф. Корабельные самолеты. — М.: Воениздат, 1990.
164. Павловский Ю. Н. Агрегирование сложных моделей и построение иерархических систем управления. — В кн.: Исследования операций, вып. 4. — М.: ЦИАН СССР, 1974.
165. Падарин В. П., Удачев В. А., Худяков Л. И. Надежность сложных судовых систем. — Л.: Судостроение, 1977.
166. Паллмаль Э. Э. Практический расчет гребного винта. — Л.: ВНИИВ, 1956.
167. Пашев В. М. Критерии для согласованной оптимизации подсистем судна. — Л.: Судостроение, 1976.
168. Пашев В. М. Оптимизация судов. — Л.: Судостроение, 1983.

260. Первозванский А. А., Гайцгорн В. Г. Дискретизация, агрегирование и приближенные оптимизация. — М.: Наука, 1979.
261. Перегудов Ф. И., Тарасенко Ф. П. Введение в системный анализ. — М.: Высшая школа, 1989.
271. Перетяков В. И. и др. К вопросу определения весовых коэффициентов. — М.: Восток радиостроения № 7, 1978.
272. Пев А. В. Современное состояние комплексного анализа. — Л.: Судостроительная промышленность № 1, 1986.
273. Подиновский В. В., Гаврилов В. М. Оптимизация по последовательно привносимым критериям. — М.: Сов. радио, 1973.
274. Подиновский В. В. Об относительной важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений. — М.: Машиностроение, 1978.
275. Подиновский В. В., Ногин В. Д. Парето-оптимальные решения. — М.: Наука, 1982.
276. Подлюкин В. Л. Теория проектирования судов. — Л.: ЛСН, 1935, 1939.
277. Подшук Л. Н. Анализ многокритериальных многоцелевых математических моделей. — Новосибирск: Наука, 1989.
278. Подшуканкин А. И. Метод оптимального проектирования с автоматическим поиском оптимальной структуры нижних конструкций. — М.: Труды ЦНИИС вып. 34, 1970.
279. Полякоти Л. С. Математическая теория оптимальных процессов. — М.: Наука, 1986.
280. Попов А. А., Толушанин Н. М., Бушуев С. Н. и др. Основы общей теории систем. Часть 1. — СПб.: ВАС, 1992.
281. Попов Г. И. Проектирование теоретического чертежа корабля. — Л.: ВМАНВ, 1958.
282. Попов Г. И. Определение главных элементов корабля в начальных стадиях проектирования. — Л.: ВМАНВ, 1959.
283. Попов Г. И. Учет требований к устойчивости в общей теории при определении главных элементов корабля в начальных стадиях проектирования. — Л.: ВМАНВ, 1961.
284. Попов Г. И. Общие требования к проектированию надводных кораблей в кадрах ВМФ. — Л.: ВМА, 1971.
285. Попов Г. И., Шауб П. А. Особенности проектирования судов обеспечения специального назначения ВМФ. — Л.: ВМА, 1976.
286. Попов Г. И., Захаров И. Г. Теория и методы проектирования кораблей. — Л.: ВМА, 1983.
287. Попов Э. В. Экспертные системы. — М.: Наука, 1987.
288. Поспелов В. И. Выбор на ЭВМ оптимальных элементов грузовых судов внутреннего плавания. — Л.: Судостроение, 1978.
289. Поспелов Д. А. Экспертные системы: востоковедение и перспективы. — М.: Наука, 1989.
290. Постнов А. А. Автоматизация сложного проектирования. — Л.: Судостроение, № 6, 1973.
291. Постнов С. И. Основы теории оценки безовой эффективности проектируемых надводных кораблей (учебное пособие). — СПб.: ВМА, 1996.
292. Прикс М. Д. Матричные графы и автоматизация проектирования. — М.: Сов. радио, 1973.
293. Проблемы методологии системного исследования (обзор статьи). — М.: Мысль, 1979.
294. Проблемы программно-целевого планирования и управления / Под ред. Г. С. Попова. — М.: Наука, 1981.
295. Проблемы системологии. Материалы 4 всесоюзного симпозиума по проблемам системологии / Под ред. В. И. Николаева. — Л.: Судостроение, 1980.
296. Проблемы формального анализа систем (обзор статьи). — М.: Высшая школа, 1968.
297. Прохой А. Н. Элементы теории оптимальных дискретных процессов. — М.: Наука, 1978.
298. Прохой А. И. О минимальных играх с последовательной информацией. — В кн.: Исследования операций, вып. 4. — М.: ВЦ АН СССР, 1974.
299. Пуанкаре А. О науке. — М.: Наука, 1983.
300. Пуанкаре В. Н. Оперативное мышление в больших системах. — М.: Энергия, 1965.
301. Пшеничный В. Б. Н. Вытрезный анализ и вытрезваемые модели. — М.: Наука, 1980.
302. Пятунин А. С. Качка и общая устойчивость корабля. — Л.: ВМА, 1972.
303. Радвак Б. Военное планирование и анализ систем. — М.: Военная, 1972.
304. Ракин Л. Г. Анализ сложных систем и элементы теории оптимального управления. — М.: Сов. радио, 1976.
305. Ракоштыс Г., Рейнландра А., Рагедел К. Оптимизация в технике, 1, 2 ч. — М.: Мир, 1986.
306. Раушенбергер Е. Н., Юсупов Р. М. Чувствительность систем управления. — М.: Наука, 1981.
307. Розенфельд А. М. и др. Практические методы расчета предельной скорости надводного корабля ветра. — Л.: Судостроение, 1969.
308. Розенкоур Л. И. Принцип максимума Л. С. Полякоти в теории оптимальных систем. — М.: Автоматика и телемеханика, ч. 1, 2, 1958.
309. Розенфельд Р. Вытрезный анализ. — М.: Мир, 1973.
310. Романов О. К. Оптимизация решений. — М.: Статистика, 1975.
311. Романьков В. И. Организация, стадии и последовательность разработки проекта корабля (учебное пособие). — СПб.: ВМА, 1996.

32. Руа Е. Проблемы и методы принятия решений в задачах с неограниченными функциями. — В кн.: Вопросы анализа и процедуры принятия решений. — М.: Мир, 1976.
33. Рыбников П. А., Парфенов Э. М. Определяющие "узлы" и значимость элементов при оценке надежности сложной системы. — М.: Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт № 6, 1978.
34. Савва Т. А. Математические методы исследования операций. — М.: Воениздат, 1963.
35. Савва Т. А. Принятие решений. Анализ иерархической структуры. — М.: Радио и связь, 1991.
36. Савва Т. А., Карнас К. Аналитическое планирование. Организация систем. — М.: Радио и связь, 1991.
37. Садовский В. Н., Юдин Э. Г. Задачи, методы и приложения в общей теории систем. — Улан: Исследования по общей теории систем. — М.: Прогресс, 1969.
38. Садовский В. Н. Проблемы общей теории систем как метаэкономика. — В кн.: Системные исследования (философия). — М.: Наука, 1973.
39. Садовский В. Н. Основания общей теории систем. Логико-методологический анализ. — М.: Наука, 1974.
40. Салуквадзе М. В. О задаче линейного программирования с векторными критериями качества. — Автоматика и телемеханика № 5, 1972.
41. Саркисян С. А., Минцлер Э. С. Экономическая оценка аэстральных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1972.
42. Саркисян С. А. и др. Теория проектирования и принятия решений. — М.: Высшая школа, 1977.
43. Садов Л. И. Методы подобия и размерности в исследовании. — М.: Техноиздат, 1957.
44. Семеница Ю. П. Автоматизированные системы проектирования второго поколения CASDAC и ZEABIRD. — Л.: Судостроение за рубежом № 9, 1979.
45. Симкин М. А. Выбор рационального сочетания элементов малого ракетного корабля с учетом срока постройки орудия. — Л.: Восточнодонецкостроение, вып. 10, 1977.
46. Системные исследования. Ежегодник (1969—1983 гг.). — М.: Наука (Институт теории систем, информатики и техники АН СССР).
47. Системный анализ и научное мышление (обзоры статей). — М.: Наука (Институт философии АН СССР), 1978.
48. Системный анализ при создании кораблей, комплексных сооружений и военной техники ВМФ (тематический сборник докладов научноисследовательского семинара). — Л.: ВМА, 1980—1994 гг.
49. Системный метод в современной науке (обзоры статей). — Новосибирск, 1971.
50. Скуринин В. И., Шайрин Б. В., Дубровский В. В. Математическое моделирование. — Киев: Техника, 1983.
51. Смирнов Е. М. Экономический анализ при проектировании судов. — Л.: Судостроение, 1961.
52. Смирнов Н. В., Дунина-Баркенович И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики. — М.: Наука, 1983.
53. Смирнов Ф. Л., Падяко С. Н., Павловский С. А. САИР: формирование и функционирование проектных модулей. — М.: Машиностроение, 1987.
54. Смирнов С. А. Судна на воздушной подушке сложного типа. — Л.: Судостроение, 1963.
55. Смирновская В. М., Макаров В. А., Терехов В. П. Организация работ в НИИ и КБ. — М.: Машиностроение, 1975.
56. Солодатов В. В. Решение задач выбора оптимальными характеристиками транспортных судов с помощью математических методов. Докл. д. т. н. — Л.: ЛГУ, 1968.
57. Солнышков Ю. С. Обоснование решений. — М.: Экономика, 1980.
58. Соловьев В. И. Сопротивляемость воды движению корабля. — М.: Воениздат, 1953.
59. Справочник по системологии. — М.: Сов. радио, 1979.
60. Справочник по судостроению / Под ред. инж. В. Л. Подкопнова, т. 9. Пространственные воюющие корабли. — М.: Обorongram, 1978.
61. Справочник по теории корабля / Под ред. В. Ф. Дробышкина. — М.: Военное издательство, 1984.
62. Статистические модели и многокритериальные задачи принятия решений (обзоры переводов). — М.: Статистика, 1979.
63. Стрелъ Ю. Г., Яковлев С. В. Математические модели и оптимизационные методы геометрического проектирования. — Киев: Наукова думка, 1986.
64. Суздаль В. Г. Теория игр для флота. — М.: Воениздат, 1976.
65. Такагара Я. Общая теория систем. 1, 2 ч. — М.: Мир, 1978.
66. Тактика надводных кораблей / Под ред. Г. А. Бодаренко. — Л.: ВМА, 1978.
67. Татарченко П. Н., Кушнер Л. И., Мешеряков Г. А. и др. Математические модели боевых действий. — М.: Сов. радио, 1969.
68. Тауэссонд К., Фост Д. Проектирование и программная реализация экспертных систем на персональных ЭВМ. — М.: Финансы и статистика, 1980.
69. Теория оптимальных решений (обзоры статей). — Киев: 1977.
70. Теория систем. Математические методы и моделирование (обзоры статей). Математика. Новое в зарубежной науке. — М.: Мир, 1989.
71. Тимофеева Т. И., Чабровская В. А. Проектирование в судостроении. — Л.: Судостроение, 1971.
72. Третьников В. И. и др. Экономическое обоснование проектных решений флота для конструктора-судостроителя. — Л.: Судостроение, 1980.



353. Трайгер Д. Я. Введение в системный анализ (учебное пособие). — М.: 1978.

354. Тронцкий Б. Л., Сударева Е. А. Основы проектирования судовых энергетических установок. — Л.: Судостроение, 1980.

355. Трухачев Р. И., Хоменко В. В. Методы оптимизации информационных систем поиска и обнаружения. — Л.: ВМА, 1971.

356. Трухачев Р. И. Принцип максимума функции неопределенности в задачах векторной оптимизации. — В кн.: Прикладные методы теории оптимизации. — Владивосток: ДВЦ АН СССР, Институт автоматизации и процесса управления, 1977.

357. Трухачев Р. И. Методы принятия решений в условиях неопределенности. — М.: Наука, 1981.

358. Уемов А. И. Виды, свойства и отношения. — М.: Изд. АН СССР, 1963.

359. Уемов А. И. Основные принципы классификации систем. Материалы к системному по логике и науке. — Киев: Наукова думка, 1966.

360. Уемов А. И. Системный подход и общая теория систем. — М.: Мысль, 1978.

361. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения, 1, 2 ч. — М.: Мир, 1984.

362. Фрохтинцев Ю. А., Матасов В. В., Башурин Л. И., Селазнев В. И. Теория и методы оценки электромеханической совместности радиометрических средств. — М.: Радио и связь, 1988.

363. Финберг П. Теория возможности для принятия решений. — М.: Наука, 1978.

364. Фрейшман Б. С. Тематический прогресс в теории сложных систем. — В кн.: Проблемы методологии системных исследований. — М.: Мысль, 1979.

365. Халиф А. И. Метод оценки многокритериальных решений. — М.: Автоматика и телемеханика № 12, 1982.

366. Хвощ В. А. Тактика подводных лодок. — М.: Военное издательство, 1989.

367. Хелдман О. Введение в теорию оптимального поиска. — М.: Наука, 1985.

368. Хилл П. Наука и искусство проектирования. Методы проектирования, научное обоснование решений. — М.: Мир, 1973.

369. Химмельбаум Д. Прикладное нелинейное программирование. — М.: Иностранная литература, 1975.

370. Хинчин А. Я. Работы по математической теории массового обслуживания. — М.: ГИИ, издательство физмат. литературы, 1963.

371. Хитч Ч. Дж. Руководство оборонной. Основы принятия решений. — М.: Сов. радио, 1968.

372. Холл А. Д., Фейджин Р. Б. Определение понятия системы. — В кн.: Исследования по общей теории систем. — М.: Прогресс, 1969.

373. Хомоджаши А. М., Шмырев А. Н. Мореходность и стабильность судов на волнении. — Л.: Судостроение, 1976.

374. Хоменко В. В. Методы оптимизации. — Л.: ЛГУ, 1973.

375. Хоменко В. В. Элементы теории многомерной оптимизации. — М.: Наука, 1983.

376. Худайбердиев Р., Цитович П. Структурное развитие систем. — Ташкент: 1977.

377. Худяков Л. Ю. Дифференциальный метод Н. Г. Бубнова и современные методы оптимизации элементов проектируемого судна. — Л.: Вопросы судостроения, серия 9, вып. 1(5), 1973.

378. Худяков Л. Ю., Корниенко Л. Н., Орлов И. Н. Оптимизация распределения запасов водоснабжения на модернизацию. — Л.: Вопросы судостроения, серия 9, вып. 3(2,6), 1973.

379. Худяков Л. Ю. Введение в теорию нелинейного пространственного проектирования. — Л.: Судостроение, 1976.

380. Худяков Л. Ю. Решение трехмерного уравнения макс. и миним. с помощью многомерной функции. — Л.: Судостроение № 9, 1979.

381. Худяков Л. Ю. Нелинейное пространственное проектирование кораблей. — Л.: Судостроение, 1980.

382. Цуккервердт А. Э. Проектирование подводных кораблей (Методы пространств). — Л.: ВМАКВ им. А. Н. Крылова, 1947.

383. Цуккервердт А. Э. Курс корабельной архитектуры. — М.: Военно-морское издательство Военно-Морского Министерства Союза ССР, 1951.

384. Цылышев В. Н. Тактика противолодочных кораблей (учебное пособие). — Л.: ВМА, 1981.

385. Чалмаев Ф. Опыт теоретического рассуждения об удобнейшем образовании и надстройке включен линейных кораблей и радио и фрегатов и других малых военных судов. — СПб.: 1836.

386. Черчесов У., Аюф Р., Ариф Л. Введение в исследование операций. — М.: Наука, 1968.

387. Четвертаков М. М., Шауб П. А. Общие принципы разработки математических моделей судов. — Л.: Вопросы судостроения, серия математические методы, вып. 8, 1973.

388. Четвертаков М. М. Организация систем управления созданием и развитием технической продукции: методические рекомендации. — Л.: ЦНИИ "РивБ", 1984.

389. Чигварин Н. В. Экспертные компоненты САПР. — М.: Машиностроение, 1991.

390. Чуров Ю. В. Основы исследования операций в военном деле. — М.: Сов. радио, 1963.

391. Чуров Ю. В., Михайлов Ю. Б., Кузьмин В. И. Проектирование количественных характеристик процессов. — М.: Сов. радио, 1975.

392. Шваров А. В., Солдатов В. В. Многокритериальное управление в условиях статистической неопределенности. — М.: Машиностроение, 1990.

393. Шауб П. А. Назначение, принципы построения и функционирования САПР. — Л.: ВМА, 1981.

394. Шапкин Ю. А. Информационные потоки. — М.: Наука, 1989.

395. Шелухин М. В. и др. Авангард капиталистических государств. — М.: Воениздат, 1973.

396. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. — М.: Издательство иностранной литературы, 1963.

397. Шеннон Р. Информационное моделирование систем — искусство и наука. — М.: Мир, 1978.

398. Шенфельд В. Т. Анализ надежности и вероятности при проектировании скоростных судов с помощью принципов динамики. — В кн.: Труды ИКИН. Проектирование и конструкция судов. — Николаев: ИКИН, 1982.

399. Шершов А. П. Возможности строительства флорбальных архитектур. — М.: Воениздат, 1933.

400. Шилейко А. В., Кожанов В. Ф., Химущин Ф. Ф. Введение в информатическую теорию систем. — М.: Радио и связь, 1983.

401. Шоломов Д. А. Логические методы исследования дискретных моделей выбора. — М.: Наука, 1969.

402. Шпур Г., Краузе Ф. Л. Автоматизированное проектирование в машиностроении. — М.: Машиностроение, 1988.

403. Шрейдер Ю. А. Равенство, сходство, порядок. — М.: Наука, 1971.

404. Шринов В. В. Системный подход к обоснованию требований к проектированию корабля. — Л.: ВМА, 1983.

405. Эйлер Л. П. Плановое расширение строения и вождения кораблей. Пер. с фр. — СПб: 1773.

406. Экироде Р. Т. Внешние многомерные критерии. — В кн.: Статистическое измерение качественных характеристик. — М.: Статистика, 1972.

407. Эллианд Н., Томаш Р. Выпуклый анализ и вариационные проблемы. — М.: Мир, 1975.

408. Эмбах У. Р. Введение в кибернетику. — М.: Иностранная литература, 1959.

409. Юдин Э. Г. Системный подход к теории деятельности. — В кн.: Методологические проблемы современной науки. — М.: Наука, 1978.

410. Юшкин В. Е. Основные проблемы организации проектирования в судостроении. — Л.: Судостроение, 1982.

411. Яглом А. М., Яглова Н. М. Вероятность и информация. — М.: Наука, 1973.

412. Яковендер В. Н. Теория и методы проектирования подводных ходов (шхунды). — Л.: ВМА, 1978.

413. Яковлев Н. А. Новый метод построения теоретического чертежа и масштаба Бенжана. — Л.: Издательство Союза морских инженеров, т. 1, 1957.

414. Яковлев Э. Н. Применение производных логических ступенчатых функций при проектировании корабля. — М.: Вопросы функционального и комплексного исследования, 660, 26, 1981.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	3
Введение .....	8
<b>Раздел I. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДОЛОГИИ, ТЕОРИИ И ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НАДВОДНЫХ КОРАБЛЕЙ .....</b>	<b>33</b>
<b>Глава 1. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К СОЗДАНИЮ НАДВОДНЫХ КОРАБЛЕЙ .....</b>	<b>33</b>
1.1. Методология системного подхода к проектированию надводных кораблей .....	33
1.2. Математическая модель корабля, ее структура и описание .....	46
1.3. Теоретические основы системного анализа в проектировании .....	64
1.4. Основные положения теории принятия проектных решений .....	74
1.5. Проблемы адекватности системных математических моделей исследовательского проектирования .....	88
<b>Глава 2. МЕТОДЫ ТЕОРИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НАДВОДНЫХ КОРАБЛЕЙ .....</b>	<b>101</b>
2.1. Особенности применения методов теории и математики в проектировании .....	104
2.2. Особенности применения методов математической статистики в проектировании .....	110
2.3. Особенности применения методов теории надежности в проектировании .....	121
2.4. Методология, теория и технология разработки систем автоматизированного исследовательского проектирования .....	128
<b>Глава 3. ОРГАНИЗАЦИЯ, СТАДИИ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАЗРАБОТКИ ПРОЕКТА КОРАБЛЯ .....</b>	<b>139</b>
3.1. Исходные данные и нормативные документы, обеспечивающие проектирование корабля .....	139
3.2. Стадии разработки проекта и ее краткое содержание .....	149
3.3. Последовательность и краткое содержание процессов разработки проекта .....	160

<i>Раздел II.</i>	<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ, АНАЛИЗ И НОРМИРОВАНИЕ СВОЙСТВ НАДВОДНОГО КОРАБЛЯ</b> .....	130
Глава 4.	<b>СИСТЕМА ОБЩИХ ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ ВМФ</b> .....	130
4.1.	Роль и задачи научно-исследовательских учреждений ВМФ в обосновании требований к надводным кораблям и судам ВМФ.....	130
4.2.	Структура системы общих технических требований ВМФ.....	139
4.3.	Содержание общих тактико-технических требований к боевым надводным кораблям и катерам ВМФ.....	186
Глава 5.	<b>ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И МЕТОДЫ СИСТЕМОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ КОРАБЛЯ</b> .....	193
5.1.	Задачи системного моделирования свойств корабля.....	193
5.2.	Особенности построения системных моделей систем свойств корабля.....	199
5.3.	Регулирование математических моделей предметной области.....	209
5.4.	Адаптация модельных фрагментов и агрегирование математических моделей анализа свойств корабля.....	220
<i>Раздел III.</i>	<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛАВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОРАБЛЯ</b> .....	229
Глава 6.	<b>ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛАВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОРАБЛЯ</b> .....	229
6.1.	Особенности определения главных элементов корабля.....	229
6.2.	Обратная задача проектирования. Постановка задачи.....	237
6.3.	Содержание задачи определения главных элементов корабля.....	246
Глава 7.	<b>МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СИНТЕЗА КОРАБЛЯ</b> .....	252
7.1.	Массовые модели синтеза корабля.....	252
7.2.	Модели, основанные на совместном решении уравнений масс и вместимости.....	266
7.3.	Дифференциальные коэффициенты приращения объема и содержания проектируемого корабля.....	280
Глава 8.	<b>МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛАВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОРАБЛЯ</b> .....	289
8.1.	Методы определения главных элементов в первом приближении.....	289
8.2.	Совместное решение уравнений масс и вместимости.....	298
8.3.	Методы определения главных элементов во втором приближении.....	307

<i>Раздел IV.</i>	<b>ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ЧЕРТЕЖА И ЧЕРТЕЖЕЙ ОБЩЕГО РАСПОЛОЖЕНИЯ КОРАБЛЯ</b> .....	324
Глава 9.	<b>СПОСОБЫ ПОСТРОЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ЧЕРТЕЖА, ВЛИЯНИЕ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ И ФОРМ ОБВОДОВ КОРПУСА НА СВОЙСТВА КОРАБЛЯ</b> .....	324
9.1.	Теоретический чертеж, главные размеры и коэффициенты формы корпуса.....	324
9.2.	Способы построения теоретического чертежа.....	332
9.3.	Влияние главных размеров и формы обводов корпуса на свойства корабля.....	347
Глава 10.	<b>ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ ОБЩЕГО РАСПОЛОЖЕНИЯ И ФОРМИРОВАНИЕ АРХИТЕКТУРНО-КОМПОНОВОЧНЫХ РЕШЕНИЙ</b> .....	361
10.1.	Основные принципы и приемы проектирования чертежей общего расположения.....	361
10.2.	Математическая модель формирования архитектурно-компоновочных решений.....	371
10.3.	Определение главных элементов корабля с учетом архитектурно-компоновочных решений.....	380
<i>Раздел V.</i>	<b>ВОЕННО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЕКТИРУЕМЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ</b> .....	386
Глава 11.	<b>ЭКОНОМИКА СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА</b> .....	386
11.1.	Организация судостроительного производства. Методы общего планирования.....	386
11.2.	Основные понятия экономики судостроительного производства.....	400
11.3.	Подходы к ценообразованию в судостроении.....	411
11.4.	Задачи органов кораблестроения ВМФ по экономической работе. Основы военного маркетинга.....	423
Глава 12.	<b>ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТОИМОСТИ СОЗДАНИЯ И СОДЕРЖАНИЯ КОРАБЛЯ</b> .....	435
12.1.	Прогнозирование затрат на проектирование и строительство корабля.....	435
12.2.	Прогнозирование стоимости эксплуатации и утилизации.....	443
12.3.	Оценка стоимости решения задачи.....	451
Глава 13.	<b>ОСНОВЫ ТЕОРИИ ОЦЕНКИ БОЕВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТИРУЕМЫХ НАДВОДНЫХ КОРАБЛЕЙ</b> .....	454
13.1.	Основы теории боевой эффективности.....	454

	13.2. Оценка ударных возможностей проектируемых кораблей .....	464
	13.3. Оценка проволочных возможностей проектируемых кораблей .....	470
	13.4. Оценка боевой устойчивости проектируемых кораблей от средств воздушного нападения .....	478
<b>Раздел VI. ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ НАДВОДНЫХ КОРАБЛЕЙ .....</b>		
<b>Глава 14. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ОПТИМИЗАЦИИ ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОРАБЛЯ .....</b>		
	14.1. Общая постановка задачи оптимизации. Основания задачи последовательного проектирования .....	488
	14.2. Критерий типа "стоимость—эффективность". Выходный анализ целевой функции .....	502
	14.3. Классификация задач оптимизации и методов их решения. Аналитические методы .....	510
	14.4. Методы математического программирования .....	525
<b>Глава 15. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫХ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОРАБЛЯ .....</b>		
	15.1. Постановка многокритериальной задачи оптимизации. Паретолевский анализ оптимальных решений .....	540
	15.2. Теоретические основы элементарного моделирования оптимальных решений .....	556
	15.3. Классификация методов решения многокритериальных задач оптимизации. Эвристические методы. Методы решения несобственных многокритериальных задач .....	571
	15.4. Формальные методы решения многокритериальных задач оптимизации в собственной постановке. Метод паркета .....	586
	15.5. Особенности решения задач оптимизации с дискретными переменными .....	602
<b>Глава 16. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ИГР И ОБОСНОВАНИЕ РЕШЕНИЙ В РАЗВИВАЮЩИХСЯ СИСТЕМАХ .....</b>		
	16.1. Основные положения теории игр .....	609
	16.2. Особенности принятия решений в условиях неопределенности .....	622
	16.3. Особенности моделирования развивающихся систем .....	629
	16.4. Примеры и подходы к формированию программ военного кораблестроения .....	642
<b>Литература .....</b>		

Игорь Григорьевич ЗАХАРОВ  
Сергей Носифович ПОСТОНЕН  
Владимир Николаевич РОМАНЬКОВ

### ТЕОРИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НАДВОДНЫХ КОРАБЛЕЙ

Технический редактор Т. А. Павлова  
Корректоры: Н. П. Перьякина, Л. Е. Орлова

---

Сдано в набор 17.06.96 г.	Подписано к печати 18.04.97 г.
	Формат бумаги 30 x 44.
Печ. л. 42,5.	Уч. изд. л. 39,5.
Заказ 134.	Уч.-изд. л. 29,3. 1997 г.

Для внутриведомственной продажи

Типография ВМД