

А.Н. ВАШЕДЧЕНКО

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СУДОВ

*Допущено Министерством
высшего и среднего специального образования СССР
в качестве учебного пособия
для студентов вузов, обучающихся
по специальности „Судостроение и судоремонт“.*

УДК 741.0



ЛЕНИНГРАД
СУДОСТРОЕНИЕ
1985

Предлагаемое вниманию читателей учебное пособие «Автоматизированное проектирование судов» написано в сотрудничестве с авторской программой для специальности «Судостроение и судоремонт» кораблестроительных факультетов вузов.

При его написании автор использовал обширную отечественную и зарубежную литературу по автоматизированному проектированию и оптимизации. Стремись, однако, осветить наиболее существенные для проектирования вопросы в тесной связи с теорией проектирования судов и учитывая ограниченность объема данного курса и учебном плане специальности. Основная задача состояла в переходе от теории автоматизированного оптимального проектирования к практическому использованию ЭВМ для оптимизации проектных решений. Предпочтено было отдать одному из популярных методов нелинейного программирования — методу сопряженных направлений. Хотя он не может быть одинаково эффективным для всех типов проектных задач, усвоение этого метода позволяет читателю быстро освоить другими методами, имеющимися в публикациях. Пакет прикладных программ «Линукс» можно без изменений использовать для решения разных оптимизационных задач, содержащих произвольное число независимых переменных и ограничений (их число указывается оператором 15 строк, 1).

Исключены в учебном пособии материалы, посвященные к типу решаемых задач, поэтому книга может быть полезна всем лицам, занятым инженерным проектированием.

Выражаю признательность коллективу кафедры проектирования судов Николаевского ордена Трудового Красного Знамени кораблестроительного института за творческую помощь в подготовке рукописи.

За критические замечания, которые помогут только при дальнейшем переработке курса, заранее выражаю благодарность читателям.

Выведенко А. Н. Автоматизированное проектирование судов: Учебное пособие. — Л.: Судостроение, 1985. — 164 с., ил.
ИСЭИ

В соответствии с программой курса «Автоматизированное проектирование судов» для учащихся вузов по специальности «Судостроение и судоремонт» рассмотрены вопросы организации проектирования судов, поиска оптимального решения, выбора критерия оптимальности, построения модели математической задачи, приведены примеры автоматизации ФЭПРД проектирования для различных случаев оптимизации с произвольной численностью и нелинейности.

В 3605130000-071 18-85
0481001-85

39.42-01

Сложность создаваемой в наши дни техники, неисчерпаемых технологий, транспортных и производственных связей экспоненциально растут. В этом состоит одна из особенностей научно-технической революции. Создавая проекты современных судов, инженеры во все большей степени используют знания смежных наук. «Можно с уверенностью сказать, что человечество пока не создало более грандиозных технических объектов, невидя кораблей. Достижения всех отраслей знания используются при проектировании, постройке и эксплуатации судов. В самом деле, вспомним, что вершинами современной инженерной мысли являются создание сверхзвуковой самолета, межконтинентальной ракеты, ядерной двигатели, лазеры. И все они используются в судостроении, причем всего лишь как отдельные элементы, составляющие гигантское сооружение — корабль»⁴. Эти слова как нельзя лучше характеризуют сложность создания современного судна, которое становится все более совершенным в дороге. В этих условиях выбор рациональных проектных решений невозможен только на основе интуиции проектиста или проектного опыта. Единственный путь создания обоснованных, оптимальных проектов — это многовариантное проектирование, которое по принятым критериям осуществимо только на базе быстродействующих вычислительной техники.

Таким образом, сложность современных судов и вытекающая из него необходимость поиска рациональных проектных решений являются первой причиной, обуславливающей необходимость автоматизации проектирования. Второй причиной можно считать большую и постоянно растущую трудность собственно конструкторских работ, составляющих основную долю проекта. Среднее по сложности судно сегодня состоит из $10^4 - 10^5$ деталей и комплектующих изделий, его проект связан с выпуском около 10^3 листов чертежей, 10^4 листов текста, 10^5 листов технологической документации [58]. Трудностью разработки проекта составляет несколько сот человек-лет. В период постройки в документацию вносятся более миллиона исправлений и изменений, вызванных неизбежностью ошибок и несоответствиями конструкторской документации при ее изготовлении традиционным способом. Длительность и трудность проектно-конструкторских работ сами по себе являются достоянным стимулом для их автоматизации. В связи с конструкторскими работами интересны обратить внимание, во-первых, на невозможность обеспечения полной согласованности всей кон-

структорской документации при ручном ее изготовлении (с вытекающими отсюда неизбежными исправлениями конструкций, удорожанием и удлинением цикла постройки) и, во-вторых, неэкономичность за фоне современных достижений науки и техники ручного конструкторского труда.

Разработка сложного проекта требует его декомпозиции и соответственного разложения всей работы на отдельные части, распределения обязанностей между разными группами проектистов, конструкторов и исполнителей. Созданию проекта превращается в труд большого коллектива. Разделение на подсистемы предопределяет обратный процесс — синтез системы, дающий возможность представить объект в целом, оценить его разнообразные качества и соответствие замыслу. При традиционной технологии проектирования в этой части работ замечаются существенные недостатки. Прежде всего, недопустимо удлиняются сроки проектирования. Еще хуже — проект в определенном смысле «застывает из-под контроля», часто на испытаниях появляются конструкции, не вполне соответствующие замыслу проектиста, у которого до начала испытаний не было возможности установить это несоответствие. В результате — переделки, удорожание конструкций и удлинение сроков реализации замысла. Это, в свою очередь, ведет к моральному старению техники еще до ввода ее в эксплуатацию. Трудности синтеза растут экспоненциально с ростом числа проектных переменных, определяющих свойства сооружения. Квалификация проектистов не оказывает существенного влияния на этот процесс, следовательно, нужно менять технологию проектирования — переходить к автоматизированному системному проектированию.

При системном подходе описание объекта и его связей производится с учетом изменений, которые он вносит в окружающую действительность и естественную среду. При этом любой объект рассматривается как некоторая система, которая может быть разделена на подсистемы. Каждая из этих подсистем, в свою очередь, может быть разделена на подсистемы более низкого порядка. Подсистемами самого низкого порядка являются элементы, внутренняя структура которых не представляет интереса для решения задачи определенного уровня, однако свойства которых влияют на свойства других подсистем и системы в целом. Очевидно, что целостность построенных иерархий систем содержит бесконечное количество систем и подсистем. При решении технической задачи нет необходимости строить всю эту иерархию, достаточно описать системы и подсистемы на два-три уровня выше и ниже исходной.

Сказанное определяет важные принципы проектирования с использованием автоматизированных систем:

— принцип системного подхода, осуществляемый определением целей и критериев проектирования, декомпозицией общей задачи на уровни и этапы, построением схемы обмена простейшими решениями между отдельными элементами, задачами и уровнями логической схемы проектирования с организацией иерархических уровней, конструированием системы оценок проектных решений на разных уровнях;

— принцип главного конструктора, заключающийся в том, что руководством разработкой системы автоматизированного проектирования и ее вы-

⁴ Дикаков А. П. Человек — инженерно-корабль. Л., 1978, с. 24

дрение должно осуществляться генеральным конструктором всего класса современных объектов проектирования — независимо от содержания логической последовательности проектных операций.

В соответствии с особенностями системного подхода в процессе проектирования судна можно выделить два крупных уровня: внешний и внутренний проектирование. Во внешней задаче судно рассматривается как элемент системы более высокого уровня — флота или комплекса совместно работающих судов. Во внутренней задаче разрабатываются составные части судна — его подсистемы как элементы системы более высокого уровня — самого судна. Сообразительная и формальная части обеих задач, сформулированные А. В. Брониковым, представлены в табл. 1.

Ввиду большой сложности и обширности указанные задачи могут быть решены только поэтапно. Каждая из них, в свою очередь, имеет два уровня. Верхний уровень внешней задачи — это определение дирек-

Таблица 1. Объекты исследования прикладного и основного частей и заданий при проектировании судов

Цель	Основные задачи теории проектирования судов	
Основная	Внешние: разработка общего требования к проектируемому судну	Внутренние: определение элементов судна
Сообразительная	Эксплуатационные и специальные требования к судам Прогнозирование развития судов. Классификация судов Связь между требованиями к судам и их частям и обобщение Требования и мероприятия к составу судна	Связь между основными элементами судна и их частями и обобщение Связь между основными элементами судна и их мерозащитными элементами
	Связь между основными характеристиками судна и эффективностью судна и флота Способы определения основных элементов судна, входящих в состав флота Задачи на проектирование средств Архитектурно-конструктивные типы судов	Связь между основными элементами судна и их эксплуатационно-экономическими показателями Многокритерия определения основных элементов судна различных типов и назначения Задачи на проектирование элементов судна Архитектура и оборудование судов Теоретический чертеж. Общие расположения
Формально-логическая	Математическая модель флота Решения алгоритмов определения состава галлейных флотов Система автоматизированного определения состава галлейного флота	Математическая модель судна. Решения алгоритмов определения основных элементов судов Система автоматизированного проектирования судов
Компьютерная	Общие требования к судам. Состав флота. Задачи на проектирование судов	Элементы судна и параметры подсистем

тивами направлений подотдела флота и обеспечение сбалансированности планируемого подотдела флота (объема перевозок) с имеющимися ресурсами. Конечная цель — определение наилучших типов судов и их количества, обеспечивающих минимум затрат на подотделе флота. Решения на этом уровне позволяют сформулировать требования к судостроительной программе и техническому заданию на различные типы судов. Нижний уровень внешней задачи — уточнение (добавление) характеристик судна, указанных в техническом задании, включая проверку совместности требований с учетом условий постройки и эксплуатации. Данные технического задания, полученные здесь, являются исходными для решения внутренней задачи проектирования. Нижний уровень внутренней задачи — детализация и обоснование проектных решений по отдельным подсистемам (корпус, техника и т. д.).

Если бы удалось представить задачу внутреннего проектирования в виде одной задачи с критерием, характеризующим эффективность судна, и с ограничениями, отражающими требования к свойствам судна и его подсистем, то можно было бы выполнять согласованное проектирование подсистем судна. В математическом плане это была бы оптимизационная задача с непрерывными дискретными и непрерывными характеристиками ограничений и критерия, чаще всего заданными алгоритмически, причем с весьма малыми возможными определениями свойств этих функций в смысле выпуклости. В такой задаче было бы большое количество неизвестных различной природы и характера, ряд условий и данных характеризовался бы сложностью и даже неопределенностью. В дополнение к этому строгая математическая постановка задачи данного уровня затруднена судостроительной спецификой: невозможно описать ряд свойств судна аналитически или в виде процедур, из-за необходимости проводить в процессе проектирования судна целый ряд экспериментов; разработка многих технических средств, составляющих основу подсистем, ведется параллельно процессу проектирования судна или даже с опережением. Но это не исключает возможность решить задачу проектирования оптимального судна как единую задачу в строгой математической постановке. Реальным является путь последовательных приближений: оптимизация элементов судна при параметрическом описании характеристик подсистем с последующей оптимизацией элементов подсистем. И здесь возникает проблема согласования решений верхнего и нижнего уровней внутренней задачи проектирования судна. Для реализации автоматизированного системного проектирования необходим метод согласования решения оптимизационной задачи для любой подсистемы, учитывающий «дефекты» всей системы, т. е. судна в целом. Такой метод в виде модрионных шагов введен в теорию проектирования судов в середине 70-х гг. [24]. Внедрение математических методов и ЭВМ в сферу творческой деятельности проектировщика связано с решением многих проблемных вопросов. Это — постановка задачи и построение адекватных математических моделей; разработка эффективных и надежных численных методов, в частности алгоритмов оптимизации в нелинейных задачах; создание работоспособных программ для ЭВМ; разработка методов устойчивости малых решений. Эти проблемы еще далеки от окончательного решения.

Основой использования ЭВМ в проектировании являются математические модели сооружений, создание которых — prerогатива проектировщика. Однако для использования их в САПР требуется еще алгоритмизировать расчеты и организовать на основе строгих технических средств риданционную автоматизированную систему накопления, хранения и выдачи информации. Эту работу выполняет специально подготовленный персонал — системные программисты и специалисты по вычислительной технике. Нельзя признать правильной на столь редкую практику выполнения всего объема работ проектирования, привносящую и иррациональную трату сил и времени. Составление хорошего алгоритма — сложная творческая работа (сравнимая, пожалуй, с музыкальной или художественной композицией), требующая серьезной теоретической и практической подготовки и совершенно иной плоскости, нежели проектирование судна. Если методической основой проектирования является решение проектной задачи при минимальном числе итераций, то методической основой алгоритмизации следует считать построение возможно более простых, «дрезинных» алгоритмов, обеспечивающих быструю и надежную подготовку олаженных программ.

Судно — сложная техническая система, поэтому никогда его проектирование не начинают с нуля. Проектный замысел и ожидаемые элементы судна, определенные с помощью закономерностей теории проектирования, служат исходной точкой в алгоритмах окончательного решения.

§ 1.3. Система автоматизированного проектирования

Автоматизированным называют проектирование с активным использованием электронно-вычислительных машин. На первых этапах автоматизации предполагалось, что использование ЭВМ для отдельных видов вычислительных работ позволит снизить трудоемкость и продолжительность процесса проектирования. Однако этого не произошло. Дело в том, что доля вычислительных работ в общей трудоемкости проектирования невелика, она не превышает 15%. Во-вторых, переход на ЭВМ вычислительных процедур требует выполнения новых трудоемких работ: двойной подготовки данных — вначале в привычном для конструктора виде, а затем на алгоритмическом языке; многократного ввода в ЭВМ одних и тех же данных, необходимых для выполнения разных расчетов (например, отдельные теоретические чертежи, используемые для расчетов прочности, остойчивости, непотопляемости, вместимости, изгибающих моментов, ходкости, построения обводов на чертежах общего расположения и т. д.).

Автоматизация проектирования особенно эффективна, когда от автоматизации отдельных инженерных расчетов переходят к комплексной автоматизации, создавая для этой цели системы автоматизированного проектирования (САПР). По существу автоматизация проектирования явилась третьим этапом научно-технической революции любой отрасли промышленности, наступившей вслед за автоматизацией производственных процессов и автоматизацией управления.

Возможность применения ЭВМ зависит от типа проектной задачи. Можно выделить четыре типа обобщенных проектных задач, связанных с различными типами объектов проектирования.

1. Проектируемый объект может быть сконструирован из готовых элементов и блоков. В этой задаче имеются наибольшие возможности применения ЭВМ для автоматизации процедур составления документов и спецификаций, хранения архивов, решения задач компоновки объекта из готовых элементов, выбора и оценки различных вариантов и др.
2. Для проектирования объекта нет полного набора готовых компонентов, но существуют аналогичные, из которых путем изменения проектных характеристик можно получить недостающие. В данном случае ЭВМ используется для анализа и оценки вариантов построения компонентов, выбора их оптимальных элементов, компоновки, детализации и т. д.
3. В отличие от второй обобщенной задачи не существует аналогичных элементов, но известны принципы их построения. Применение ЭВМ для автоматизации процессов проектирования объектов возможно при использовании математических моделей, соответствующих используемым принципам, по которым отрабатываются конструктивные решения.

4. В отличие от третьей обобщенной задачи неизвестны принципы построения элементов объекта, что характерно для создания принципиально новых объектов и систем. Опораясь на результаты проводимых фундаментальных и прикладных исследований, ЭВМ применяют при проектировании таких изделий (помимо выполнения научно-исследовательских расчетов) для моделирования реальных физических процессов и явлений, обработки данных и управления модельными и натурными испытаниями и др.

Возрастание сложности проектируемых объектов привело к формированию концепции и методологии автоматизации проектирования, в которых моделирование является одним из основных методов обоснования проекта. САПР можно рассматривать как систему, основанную на регулярном применении современных математических методов и средств вычислительной техники в процессе принятия проектных решений, в организации и управлении проектированием. В САПР с помощью ЭВМ частично или полностью автоматизируются процедуры подготовки и обработки информации, выполнения расчетно-графических работ, проектирования документации. Нужно иметь в виду, что термин «система проектирования» не является синонимом понятия «конструкторское бюро», она охватывает только ту сторону деятельности разработывающего подразделения, которая непосредственно связана с проектированием и получением проектных документов.

САПР инициирует модификацию организационной структуры, специализацию работников по видам выполняемых работ, новую механизацию и автоматизацию рутинных операций, широкое использование технических средств проектирования, высокий профессиональный уровень специалистов-пользователей, ориентацию на процедуры генерации вариантов решения и анализе как наиболее творческую часть работы.

В первом периоде автоматизации сосредотечены расчеты, требующие больших объемов информации и долго формирующиеся в виде четкой последовательности арифметических и логических действий. Были автоматизированы расчеты статик, прочности, жесткости и ряд других. В некоторых случаях разработка новых способов расчета потребовала переработки применявшихся ранее расчетных методов для освобождения их от дублирующей, не имеющих достаточно строгих обоснований и оправданных лишь трудоемкостью ручной работы.

На следующем этапе развития автоматизации господствовала концепция о необходимости создания комплексных взаимосвязанных программ, с помощью которых автоматизируется процесс выполнения крупных объемов взаимосвязанных проектных работ. Такие комплексы программ были разработаны и явились основой специализированных САПР первого поколения, появившихся в начале 60-х гг. Эти САПР были процедурно-ориентированными: все программы имели последовательную связь (рис. 1, а), информация из одной программы передавалась в следующую без дублирования с проектантом. С помощью таких систем, по существу являвшихся закрытыми автоматическими системами, можно было решать только вполне определенные типы задач. Решению

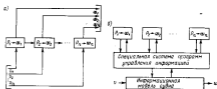


Рис. 1. Последовательное (а) и параллельное (б) создание программных модулей. P — входные данные; W — выходные данные; F — вычислительная операция

трудно типа задач с теми же известными данными требовало переработки части программ и новой отладки всей системы. К числу процедурно-ориентированных САПР относятся «British» (Великобритания), «Autokon-1» (Воронеж), НИАС (Ярослав), СПРОС (Советский Союз). Закрытые системы не допускали изменения или расширения состава исходных данных, использования новых расчетных процедур. Все это способствовало развитию творческого начала в работе проектантов в автоматизированном режиме. Вычислительная техника третьего поколения (табл. 2) открыла возможность построения более гибких систем, ориентированных на базу данных (БД). В такой системе все программы, описывающие элементарный законченный расчет (например, расчет массы корпуса, буксировочной мощности и т. п.) и называемые программными модулями (ПМ), существуют параллельно со специальным блоком управления информацией. Информация находится в запоминающих устройствах (ЗУ) ЭВМ независимо от того бы то ни было программы, использующих эти данные — образуется БД. БД тоже создается с блоком управления и через него с программными модулями (рис. 1, б). Блок управления содержит систему программ, выдающих предельные команды в базу данных и обеспечивающих выполнение этих команд. Команды инициируются работой индивидуальных или к блоку управления ПМ. Блок управления называется системой управления БД (СУБД). БД и СУБД образуют автоматизированный банк данных (АБД), он существует независимо от состава и числа программных модулей, которые могут изменяться при решении разных задач. Только так же в зависимости от рода решаемой задачи пользователь может внести, стереть или направить информацию в БД.

Например, АБД системы «Autokon-1» состоит из БД, размещенной на 2 млн. слов, и системы управления БУР (Data base Utility Program), реализующей следующие команды: READ — считать данные, WRITE — записать данные, DELETE — стереть данные, COMPRESS — упорядочить данные, DUPLICATE — продублировать данные и т. д.

2. Таблица 2. Характеристики отдельных ЭВМ, применяемых на малых предприятиях (по данным ГАИР)

Показатели	СЭВ					Время	
	Этапы применения ЭВМ						
	I этап	II этап	III этап	IV этап	V этап		
Тип используемой ЭВМ	IBM 650	CDC 160A	IBM 7090	IBM 1130	COB 6800	IBM 7090	ИТАС 3010
Тип перфоленты	1960	1961	1963	1974	1967	1961	1962
Ширина ленты, мм	40	32	32	> 20 мм/бит	32	32	40
Тип вставки ЭВ	Магнитные диски	Магнитный барабан	Магнитный барабан	Магнитные диски	Магнитные диски	Магнитный барабан	Магнитные диски
Ширина вставки ЭВ, мм	4000	130	830	830	73 000	830	330
Объем вставки (байтов)	6		48			48	
Проект дистрибуции	100	6,4	12	< 0,01	0,025	12	3,5
Имя языка	FORTRAN	AUTOCOMM	FORTRAN, COBOL, APT	FORTRAN, ALGOL, COBOL, APT	FORTRAN, ALGOL, COBOL, APT	FORTRAN, COBOL	FORTRAN
Скорость	182-850 тыс. знаков	90 тыс. знаков	1750-3750 тыс. знаков			9350-3750 тыс. знаков	
Прочие данные			Самостоятельно выполняются 34 процента		Исполнительные программы 7 млн. инструкций в секунду		

Показатели	Имя					Время		
	Этапы применения ЭВМ							
	II этап	III этап	IV этап	V этап	VI этап			
Тип используемой ЭВМ	ИТАС 8500	IBM 360 40	IBM 370 168	Univac 1108	GIER	IBM 1130	IBM 360 60	Sab-D 22
Тип перфоленты	1967	1963	1972	1963	1961	1965	1965	1968
Ширина ленты, мм	324	254 мм/бит	8 мм/бит	138	4	8	512 мм/бит	252
Тип вставки ЭВ	Магнитные диски	Магнитные диски	Магнитные диски	Магнитные диски	Магнитные диски	Магнитные диски	Магнитные диски	Магнитные диски
Ширина вставки ЭВ, мм	7250	7250		22 000		512	4224 · 10 ³	31 500
Объем вставки (байтов)							388	
Проект дистрибуции	1,46	1,5	0,08	0,33	6,6	4,0	1,8	1,6
Имя языка	FORTRAN, ALGOL, BASIC	FORTRAN, COBOL, PL/I, CLAN	FORTRAN, COBOL, PL/I, CLAN	FORTRAN, ALGOL	FORTRAN, ALGOL	FORTRAN, ALGOL	FORTRAN, COBOL, PL/I, ACUTE	FORTRAN, COBOL, PL/I, ALGOL
Скорость		2 млн. знаков	Безразлична скорость чтения 7 млн. знаков секунды в секунду	400 тыс. знаков	30 тыс. знаков	27,2 тыс. знаков		250 тыс. знаков
Прочие данные		Максимальная скорость чтения 7 млн. знаков секунды в секунду						

Примечания: I этап - применение ЭВМ для решения отдельных задач в разрабатываемом; II этап - применение ЭВМ в составе САИР впродолжение; III этап - применение ЭВМ в составе САИР в течение всего цикла; IV этап - применение ЭВМ в составе САИР впродолжение.

Таблица 3. Эволюция науки об образовании САПР

		Этапы в эволюции науки о разработке САПР			
Вид образования	Инженерное образование	Наскромное инженерное образование в области САПР (1956-1964 гг.)	САПР первого поколения, инженерное образование (1965-1985 гг.)	САПР второго поколения, инженерное образование (1975-1985 гг.)	САПР третьего поколения, инженерное образование (1986 и последующие годы)
	Техническое образование	2М 1-го поколения Устройства алгоритмизированной обработки информации в САПР	2М 2-го поколения Устройства алгоритмизированной обработки информации в САПР	3М 3-го поколения Шаблоны и графические языки, алгоритмы обработки текста, языки, языки программирования, языки моделирования	2М 4-го поколения Устройства, обеспечивающие работу с данными в САПР и автоматизированные обучающие комплексы
Математические	Статистические алгоритмы и методы		Комплексы алгоритмов и методов для работы с данными	Функциональные модели для работы с данными	Матричные, векторные, матричные методы
	Предметные трансляции	Отсутствуют	Начаты разработки для предметных областей знаний	Базовые программы (язык, компилятор, транслятор, редактор) системы с предметными ориентированными программами	Системы формальных методов и многоуровневые верификационные системы с предметно-ориентированной архитектурой
Областные	Областные	Областные	Областные	Областные	Областные
	Информационные	Информационные	Информационные	Информационные	Информационные
Информационные	Информационные	Информационные	Информационные	Информационные	Информационные
	Информационные	Информационные	Информационные	Информационные	Информационные
Программное обеспечение	Программное обеспечение	Программное обеспечение	Программное обеспечение	Программное обеспечение	Программное обеспечение
	Программное обеспечение	Программное обеспечение	Программное обеспечение	Программное обеспечение	Программное обеспечение

СУБД постоянно развиваются, и их уровень определяет поколение системы автоматизированного проектирования (табл. 3). СУБД первого поколения играли лишь вспомогательную роль в операциях обработки информации, выполняющихся вручную в процессе автоматизированного проектирования. Системы второго поколения обеспечивали автоматический ввод-вывод информации, СУБД третьего поколения дополнительно к вводу-выводу информации обеспечивали автоматическое изменение или удаление информации пользователями или отладкой прикладной программы. Системы четвертого поколения предназначены для формирования произвольного построения данных в ЭВМ, автоматического поддержания целостности этих построений (структур) и эффективного извлечения из них требуемых данных. Известно, что автоматизм поддержания целостности структур массовой информации и эффективность централизованного поиска требуемых данных отличают СУБД пятого поколения от предыдущих.

Дальнейшее развитие СУБД привело к образованию в автоматизированных системах третьего поколения мониторинг-исполнительных систем, или «мониторов» САПР, которые обеспечивают поддержание средствами взаимосвязанного управления программным и информационным обменом и позволяют оперативно изменять как направление поиска решений, так и сам характер процедур в процессе этого поиска.

Проектирование можно рассматривать как информационный процесс, потому САПР по существу является информационно-вычислительной системой, в которой осуществляется преобразование исходной информации о проектируемом объекте, состоянии знаний в рассматриваемой области, представляем омыте проектирования в выходную информацию в виде проектных документов, выложенных в удобной форме и содержащих решения или результаты проектирования. Важной характеристикой САПР является степень ее информативной связи с окружающей средой. Система называется статической, если в процессе проектирования не требуется информации о состоянии внешней среды в данный момент времени, и динамической, если при своем функционировании система непрерывно потребляет информацию о состоянии внешней среды из источников, находящихся вне системы проектирования.

Различают четыре вида САПР.

1. Уникальные междотраслевые по характеру, создаваемые для решения крупнейших народнохозяйственных задач, решение которых представляет существенный этап в научно-техническом прогрессе общества. С затратами на создание таких САПР обычно не считается, при этом сами САПР часто имеют короткий «жизненный цикл», ориентированный со временем проектирования уникального изделия.

2. Универсальные междотраслевые названные с системой коллективного пользования, включающие банки информации и интеллектуальные терминалы, имеющие дело со всей номенклатурой технических изделий отрасли (подотрасли). Такие САПР обычно строятся по двухуровневому иерархическому принципу: на первом уровне — машинный ЭВМ с большим объемом памяти и большим быстродействием, на втором —

Таблица 4. Основные характеристики базовых ЭС ЭВМ

Показатели	ЭС-1012						ЭС-1015						ЭС-1048						ЭС-1050						ЭС-1060					
	«ДИАЛОГ»*		«Эксперт»		«Эксперт»		«Эксперт»		«Эксперт»		«Эксперт»		«Эксперт»		«Эксперт»		«Эксперт»		«Эксперт»		«Эксперт»		«Эксперт»		«Эксперт»		«Эксперт»			
Мощность, тыс. евро/г	80		300		150		250		450		1500		1500		1500		1500		1500		1500		1500		1500		1500			
Время работы с фотонакопительной пленкой, сек	3,3-6		1,4-2		1,7-3		1,2-1,8		0,65		0,2		0,2		0,2		0,2		0,2		0,2		0,2		0,2		0,2			
Ареалы умножения с фотонакопительной пленкой, мм	29-42		8,5		10-12		7		8		0,6		0,6		0,6		0,6		0,6		0,6		0,6		0,6		0,6			
Радиусы проекции, байт	128-512		236-512		236-512		236-512		236-512		236-512		236-512		236-512		236-512		236-512		236-512		236-512		236-512		236-512			
Емкость ОЗУ, байт	21		25		25		25		25		25		25		25		25		25		25		25		25		25			
на магнитном носителе	7,25		3,7		3,7		3,7		3,7		3,7		3,7		3,7		3,7		3,7		3,7		3,7		3,7		3,7			
на магнитном носителе ЭВМ	40		40		40		40		40		40		40		40		40		40		40		40		40		40			
время обработки в ОЗУ, сек	2		3		3		3		3		3		3		3		3		3		3		3		3		3			
Скорость обработки в магнитном носителе, байт/сек	660		600		740		1200		1200		1200		1200		1200		1200		1200		1200		1200		1200		1200			
Скорость сканирования пленки	660		600		740		1200		1200		1200		1200		1200		1200		1200		1200		1200		1200		1200			

Таблица 5. Основные характеристики базовых ЭС ЭВМ

Показатели	ЭС-1012						ЭС-1015						ЭС-1048						ЭС-1050						ЭС-1060					
	«ДИАЛОГ»*		«Эксперт»		«Эксперт»		«Эксперт»		«Эксперт»		«Эксперт»		«Эксперт»		«Эксперт»		«Эксперт»		«Эксперт»		«Эксперт»		«Эксперт»		«Эксперт»		«Эксперт»		«Эксперт»	
Мощность, тыс. евро/г	500		1000		1500		2500		4500		15000		15000		15000		15000		15000		15000		15000		15000		15000			
Время работы с фотонакопительной пленкой, сек	16		16		16		16		16		16		16		16		16		16		16		16		16		16			
Ареалы умножения с фотонакопительной пленкой, мм	7		7		7		7		7		7		7		7		7		7		7		7		7		7			
Радиусы проекции, байт	81		81		81		81		81		81		81		81		81		81		81		81		81		81			
Емкость ОЗУ, байт	12		12		12		12		12		12		12		12		12		12		12		12		12		12			
на магнитном носителе ЭВМ	20		20		20		20		20		20		20		20		20		20		20		20		20		20			
время обработки в ОЗУ, сек	1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1			
Скорость обработки в магнитном носителе, байт/сек	660		600		740		1200		1200		1200		1200		1200		1200		1200		1200		1200		1200		1200			
Скорость сканирования пленки	660		600		740		1200		1200		1200		1200		1200		1200		1200		1200		1200		1200		1200			

Ук 7410



периферийные ЭВМ, обслуживающие отдельные терминалы, устройства, абонентские пункты. Имеющийся опыт показывает, что годовой объем проектной документации, создаваемой такой САПР, достигает 10 тыс. комплектов с физическим объемом до 100 тыс. документов.

3. Специализированные проектной организации, по существу такие системы коллективного пользования, но ориентированные на выполнение наиболее массовых проектных работ по конкретному направлению и реализованные на ЭВМ серий ЕС и СМ (табл. 4 и 5). С помощью таких систем пользователи получают возможность применить эффективные математические модели, методы моделирования и оптимизации на всех основных стадиях проектирования заданного объекта.

4. Индивидуальные, реализованные на мини- и микро-ЭВМ, предназначенные для выполнения отдельных видов инженерных расчетов и проектных работ, например чертёжно-графических работ, инженерно-проектных расчетов и др. Условно к этому типу САПР можно отнести автоматизированные рабочие места (АРМ), построенные на мини-ЭВМ, которые могут также входить в состав САПР более высокого уровня иерархии. Наиболее распространены САПР 3-го и 4-го типа.

На рис. 2 приведена схема организации проектных процедур в обобщенной системе автоматизированного проектирования, отражающая информационные связи в процессе проектирования, при этом весьма соответствуют следующим проектным операциям и процедурам: формулировка задачи 1; сбор информации 2; обобщение мирового научно-технического уровня 3; автоматический поиск информации 4; поиск вариантов решения 5; выбор наилучших методов 6; форматизация методов проектирования и стимулирование творчества 7; анализ и оценка решений 8; сравнение результатов 9; описание объекта, формирование его модели 10; моделирование и оптимизация 11; детальное проектирование 12; выбор решения 13; управление чертёжными автоматами 14; выпуск чертёжей 15; проверка чертёжей 16; выбор библиотечных элементов 17; ведение архива 18; автоматическое составление каталогизации 19; автоматический поиск чертёжей 20; автоматический поиск стандартов 21; комплектовка документации 22; обработка документации 23; подготовка нормативных материалов 24; руководство и справочные документы 25; подготовка машинных носителей 26; размножение документации 27; подготовка данных для БД 28.

Указанные базовые процедуры реализуются основными подсистемами преобразованной информации, входящими в состав САПР. Рассмотрим следующие подсистемы.

Информационная подсистема. Основная задача этой подсистемы состоит в сборе, хранении, поиске, упорядочении, пополнении, выдаче всей необходимой для обеспечения процесса проектирования информации. Применение ЭВМ позволяет создать БД как совокупность упорядоченных комплексных сведений о проектируемом объекте, включающая в себя:

данные о мировом научно-техническом уровне, фиксируемые в публикациях, патентах и изобретениях и т. д.;

фонд методов генерации вариантов решения с учетом специфики новых принципов действия с библиотечкой физических эффектов и др.;

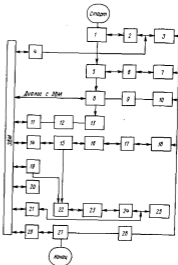


Рис. 2. Схема организации процедур в САПР

методики проектирования, представляющие собой формализованный коллективный опыт специалистов в данной области;

описание проектных характеристик объекта, его моделей для различных стадий проектирования;

архив – хранение накопленного в системе опыта в виде уже имеющихся решений как всей задачи в целом, так и ее отдельных фрагментов: описания типовых элементов, комплектованных изданий, материалов и др.;

руководящие и справочные данные, нормы, стандарты, постановления и другие данные, регламентирующие процесс проектирования.

Имеется система управления БД, реализованная в БД, регулирующая механизм доступа к данным (записи, объединения, стирание или выдачу информации) в зависимости от запросов и их приоритетов, машинных ресурсов и т. д.

Понятно, что разработка информационной подсистемы и ее основных компонентов (структур данных и памяти, систем кодирования, характера обмена с пользователями, видов управления и характера обработки и др.), а также ее эксплуатация, постоянное совершенствование и пополнение выводит за пределы возможностей проектирования конкретных технических объектов, квалифицированного специалиста в своей области. К тому же это частная задача использования универсальных средств современных информационно-вычислительных систем, решаемая специалистами соответствующего профиля, которые вводят в организационную структуру системы автоматизирующего проектирования.

Из проектных процедур, указанных на рис. 2, к информационной подсистеме относятся 1-4, 17, 18, 20, 21, 23, 26.

Подсистема поиска решений технической задачи. Потребность в поиске и разработке новых технических идей и решений возникает на начальных стадиях проектирования при поиске альтернативных вариантов будущих решений для технических объектов. В настоящее время существует самые различные методы поиска решений технических задач, применение ЭВМ в которых позволяет, с одной стороны, организовать эти поиски, сделать их более целенаправленными и осознанными, а с другой стороны — повысить эффективность их выполнения, программно реализовать элементы поиска решений, относящиеся к фактуральным действиям.

Когда учитывается важность этой подсистемы, то в организационной структуре САПР предусматривают группу специалистов в данной области, полностью или частично рассматриваемую подсистему новыми алгоритмами фирмы.

Подсистема инженерного анализа (моделирование объекта и оптимизация его характеристик). Основное назначение этой подсистемы состоит в выполнении всех вычислительных работ, связанных с детализацией выбранного варианта решения проектной задачи. Важность этой подсистемы определяется общей тенденцией использования сложных моделей объектов и мощных вычислительных методов, что позволяет значительно приблизить модель к действительным показателям объекта. Вычислительные методы в настоящее время применяются в таких задачах, которые еще недавно решали интуитивно. Примерами могут служить задачи разработки внешнего вида объекта, протрастированного проектирования и др. Следует отметить, что арсенал вычислительных методов всевозможен: используются, многие инженерные задачи проектирования специализируют разработку новых подходов в методах, новых критериев и алгоритмов.

Постоянно уточняется и модифицируется и сама методика проектирования. Поэтому в структуре САПР должна быть предусмотрена возможность изменения отдельных частей системы, определения новой методикой проектирования и новыми используемыми вычислительными методами, без изменения остальных составляющих или с их незначительными изменениями.

Разработку и эксплуатацию подсистемы инженерного анализа выполняют специалисты соответствующих профилей, входящих в организационную структуру САПР. Основное проектирование — использовать САПР тесно взаимодействует с этой группой специалистов, так как только он как специалист в своей области может уловить и формализовать математические модели проектируемых объектов, передать модификации методов проектирования, исходя из возможностей, обусловленных новыми вычислительными и проектными процедурами. В соавторстве с проектировщиками работают пользователи-программисты, которые помогают ему для новой задачи вносить изменения в программы модулей расчета отдельных этапов проектирования, включать в систему вновь разработанные программные модули, а также вносить в систему описание новых объектов проектирования и новые элементы в ядро. При этом проектировщику и программисту не требуется знания полной структуры САПР и детального взаимодействия ее частей. На рис. 2 подсистема инженерного анализа отображена процедурами-блоками 8-11 и 18.

Подсистема ведения и изготовления документации. Проектно-конструкторская документация, в которой отображен будущий объект, является основным результатом функционирования системы проектирования, и наличием документации ведения и изготовления документации состоит в обеспечении получения проектных документов (чертежей, технических описаний, слез, графиков, таблиц и т. д.), необходимых для создания объекта проектирования. Разработка и изготовление документации на всех этапах проектирования составляет обычно 45-60% всех трудозатрат, причем это наиболее творческая, разнообразная и довольно умознательная работа. Ее автоматизация позволяет, с одной стороны, существенно сократить затраты труда и времени, а с другой — специалистам легко обеспечить решение во все части проектной документации изменений и коррекций.

Автоматическое проектирование документации, полностью заменяемое человеком, осуществляется с помощью широкого набора современных технических средств: чертежных автоматов и графопроекторов, устройств микрофильмирования, репродуцирования и др.

В рассматриваемой подсистеме осуществляется компоновка документов, т. е. разбиение их на страницы стандартного формата, размещение графических символов на поле одной страницы, проведение соединений линий между размещенными графическими символами, при этом учитываются различные требования и ограничения.

Используемые для получения документации устройства можно разделить на два типа.

1. Быстродействующие дисплет и алфавитно-цифровые печатание устройства (АЦПУ), позволяющие организовать контроль за качеством изготовления документации и оперативно вносить в нее изменения; при этом в случае использования дисплета требуется дополнительное оборудование для получения "дизер" копии, а АЦПУ обладает ограниченными алфавитом, снижающим качество окончательного документа.

2. Медленные графопроекторы (часто с печатной головкой), дающие возможность получить графическую документацию в закончен-

ном виде. Рассматриваемые подсистемы, в частности, реализуются процедурами 14-16, 22-24, 26, 27, показанные на рис. 2.

Отличительная черта современных САПР заключается в том, что они ориентированы на сквозную автоматизацию, для чего предусматривается не только выпуск проектной документации для объектов, но и одновременное изготовление машинных носителей информации для технологических автоматов, с помощью которых изготавливается объект, станков с числовым программным управлением, обрабатывающих центров, промышленных роботов, программы для ЭВМ грузозахватных устройств, контрольных автоматов и др.

Приведенные подсистемы составляют основу новой технологии автоматизированного проектирования инженерных объектов и являются, по существу, инвариантами по отношению к объекту проектирования. При этом указанной технологией проектирования пользуются проектировщик, не обладающий глубокими знаниями в области программирования. Ему достаточно знать только Правила Записи технического задания на проектирование с помощью специальных языков описания объекта и директив управления системой, чтобы инициировать процесс обработки и отображения информации в САПР. Специальные диалоговые средства, рассмотренные выше, позволяют ему оперативно получать промежуточные результаты в процессе решения задачи и иметь возможность влиять на ход ее решения, не прерывая вычислительного процесса. Средством доступа к взаимодействию с ЭВМ является терминал, в качестве которого может быть консоль, дисплей и пр.

5.1.2. Программное обеспечение САПР

Для работы САПР требуется несколько видов обеспечения. В табл. 3 перечислены шесть видов, из которых для читателя этого учебника интерес представляют математическое, прикладное программное и, в некоторой степени, информационное обеспечение.

Математическое обеспечение САПР — это математические модели проектирования, которые рассматриваются далее в гл. 2.

Программное обеспечение САПР подразделяется на общее и прикладное. Общее — набор программ, предназначенных для повышения эффективности использования вычислительных комплексов САПР и производительности труда персонала, обслуживающего эти комплексы. Прикладное — определенным образом составленные заборы программ, предназначенные для непосредственного использования при решении проектно-конструкторских задач. Сложность, объем и стоимость программного обеспечения возрастают быстрыми темпами. Так, если в начале 70-х гг. затраты на программное и аппаратное обеспечение относились как 2:1, то по прогнозам на 1985 г. они будут относиться как 5:1. Высокая стоимость создания программного обеспечения и значительной степени определяется трудоемкостью его создания. Она доходит до 60% общей трудоемкости создания программного обеспечения. Разработка этого обеспечения представляет собой длительный итерационный процесс,

так как на начальных стадиях не всегда удается точно сформулировать алгоритмы и методики, а эти возможности невозможно выявить до ввода и выполнения ПМ. Другими видами ошибок, обнаруживаемых в процессе отладки программного обеспечения, являются ошибки исходных данных, ошибки исполняемых операторов, ошибки в операторах-обращении и операторах передачи управления. Статистика оценивает число операторов с ошибками как 2% от общего числа операторов в программных модулях, причем наибольшее число ошибок приходится на операторов передачи управления — примерно 10% их общего числа. Этими цифрами можно руководствоваться для оценки трудоемкости отладки вновь формируемых пакетов программ, если принять во внимание, что средние затраты времени на выделение одной ошибки в ПМ объемом 2 тыс. операторов составляют около 3 ч, а комплексная отладка в динамике пакета программных модулей объемом до 80 тыс. операторов требует около суток.

Информационное обеспечение — совокупность массивов, содержащих сведения о правовом характере и входящих в БД. Это сведения по построенным судам, заводам, металлам, материалам, оборудованию и пр. На ранних стадиях автоматизации проектирования существовала потребность хранить в ЗУ ЭВМ только отдельные сведения справочно-информационного характера. Прогресс в развитии САПР потребовал существенного увеличения объемов используемой информации и соответственно перехода от фрагментарной к интегральной обеспеченности. Одним из первых достижений на этом пути являлась организация информации в виде совокупности массивов данных (файлов). В начале 60-х гг. файлы (англ. — файл, отсюда) записывались простым последовательным способом. Обработка производилась в пакетном режиме без доступа в реальном масштабе времени. Хранились несколько копий одного и того же файла, так как после однократного использования предшествующие поколения данных уничтожались. Один и те же данные редко использовались для нескольких задач. В файлах наблюдалась высокая степень избыточности информации. К концу 60-х гг. была достигнута высокая обработка информации в оперативном или реальном масштабе времени, ЗУ можно было менять без изменения прикладной программы, но в массивах еще существовала значительная избыточность данных. К началу 70-х гг. наступил третий этап развития информационного обеспечения. Обеспечен доступ к одним и тем же данным для различных задач разными путями. Программное обеспечение содержит средства уменьшения избыточности данных. Физическая структура данных неизвестна от прикладных программ, ее можно изменить с целью повышения эффективности БД, не выходя при этом модификации прикладных программ. К концу 70-х гг. относится четвертый этап — программные средства обеспечивают логическую и физическую независимость данных, допуская существование глобального представления данных. Создается БД для выдачи ответов на не планируемые заранее информационные запросы. Создается СУБД. Современные САПР характеризуются наличием АБД, в состав которых входят совокупности массивов информации для проектирования, языковые средства описания и манипулирования данными, средства организации, хранения, копирования и доступа к этим данным. АБД могут использоваться как в составе САПР,

Так и в транзакционных системах проектирования, обеспечивая полную автоматизацию процесса накопления, хранения и доступа к данным во всех режимах использования вычислительной техники.

При разработке программного обеспечения САПР используется принцип модульности как на уровне программ, так и на уровне языка программирования, организации общей БД, создания автономных подсистем предварительной подготовки исходных данных.

Технические параметры общего программного обеспечения САПР определяются существующей инфраструктурой операционных систем (ОС) и комплексов программ технического обслуживания. Основными операционными системами ЕС ЭВМ являются ОС ЕС и ДОС ЕС, предназначенные для использования на всех совместимых моделях ЕС ЭВМ. Операционные системы обеспечивают высокий уровень производительности вычислительной системы, позволяя программисту:

делить задачу на части, кодировать каждую часть на языке, наиболее для нас подходящем, и затем объединить их в готовую к исполнению программу;

делить большую программу на секции, с тем чтобы уменьшать потребность в основной памяти;

автоматизировать процесс отладки программ;

иметь готовые к исполнению программы в системную библиотеку и получать доступ к этим программам с помощью символических запросов;

выключать программу непосредственно после ее трансляции либо заменять результаты трансляции;

использовать стандартные процедуры ввода-вывода для работы с данными.

Функциями ОС ЕС представляет собой несколько программных библиотек и системных таблиц. Основными компонентами ОС являются управление и обработка программ, а также сервисные (обеспечивающие и вспомогательные) программы (рис. 3).

Управляющие программы реализуют функции управления заданиями, управления ходом выполнения программ и управления данными. Управляющая программа следит за выполнением обрабатываемых программ и трансляционных программ, составленных пользователем. В состав управляющих программ входят программы:

управления заданиями (супервизор), управляющая всем ходом вычислительного процесса на машине;

управления заданиями, подготавливающая систему для выполнения пакета заданий;

управления данными, осуществляющая передачу данных между основной памятью и внешними устройствами;

управление восстановлением системы, используемая при переходе системы от одного режима работы к другому.

Управляющие программы осуществляют первоначальную загрузку основной памяти и управление всей работой системы, включая обработку прерываний, распределение работы каналов, загрузку программ



Рис. 3. Структура систем программного обеспечения ЕС ЭВМ

из библиотек в оперативную память. Они организуют прием заданий, их контроль, подготовку запрашиваемых программ к исполнению, их запуск, автоматический переход к следующему заданию.

Ход решения задачи непосредственно контролируется программой-супервизором. Задача может выполняться в однопользовательном или мультипользовательном режиме. В однопользовательном режиме ЭВМ выполняет одну задачу, и все технические средства ЭВМ находятся в распоряжении этой задачи. В мультипользовательном режиме ЭВМ может одновременно выполнять несколько независимых друг от друга задач, и ОС ЕС должна распределять технические средства между этими заданиями. Термин „длинно-прерывно“ не следует понимать буквально: прерываниями изменений в аппаратуре не происходит, а каждый момент процессор может обрабатывать только одну программу, но ассинхронная работа каналов ввода-вывода и процессора позволяет на время обмена данными одной программы „отдать“ процессор другой программе, т. е. пока одна программа находится в состоянии ожидания конца ввода-вывода, процессор обрабатывает другую программу. Для оператора эти программы выполняются „длиннопрерывно“. ОС ЕС обеспечивает динамическое распределение памяти и возможность работы по приоритету со многими заданиями и заданиями.

К обрабатывающим программам относятся трансляторы с основных алгоритмических языков FORTRAN, ПЛ/1 и др. Важное свойство алгоритмических языков – возможность автоматического перевода описания задачи в машинную программу. Описание алгоритма на алгоритмическом языке получается сжатым и представляется в символах, словах с математическими, что облегчает их чтение. Алгоритмические языки обеспечивают возможность задавать алгоритм решения задачи независимо от ЭВМ, на которой задача будет решаться. Специфику машины учитывает язык ассемблера, связанный с программистом обязанности по закодированию ма-

инных кодах команд, вычисление истинных адресов памяти и т. д.

В ОС программы, написанные на алгоритмическом языке, транслируются в объектный модуль, поэтому специфика истинного языка программирования после трансляции теряется. Для того чтобы получить программу, готовую к выполнению, объектный модуль должен быть обработан редактором связей. Результат работы редактора связей называется абсолютным или загрузочным модулем. Загрузочный модуль может собираться из отдельных протранслированных частей (объектных модулей) и подпрограмм, хранящихся в библиотеках.

В соответствии с особенностями загрузки абсолютные (программные) модули делятся на однократно используемые, которые используются в рендербиблиотек. Последние напоминают реализации рекурсивной процедуры, которая использует саму себя в качестве подпрограммы. Тип модуля определяется во время редактирования связей по указанию программиста.

По структуре загрузочные модули могут быть простыми и связываемыми. Простой загрузочный модуль содержит в себе все команды, необходимые для его выполнения. Если дана модуля оказывается слишком большой, то используют сегментированные модули. В том случае может быть применена сегментная структура, при которой одна и та же область ОЗУ используется различными сегментами, связанными друг друга. Для сложных задач применяют динамические структуры абсолютных модулей, когда сегменты выполняются и загружаются в ходе процесса выполнения программы по мере необходимости.

Операционная система содержит следующие сервисные программы: „редактор связей“ (обеспечивает получение программы, готовой к использованию на ЭВМ);

„сборщика-объединителя“, или библиотечка (обеспечивает корректуру кода и обслуживание библиотек ОС ЕС);
напоминатель проверки наличия устройств;
перезапис массивов с носителя на носитель, перегруживания записей и ускоренная массивов (утилиты);
система печатных отчетов на проблемно-ориентированном языке и др.

Сервисные программы осуществляют объединение отдельных транслируемых модулей в одну или несколько исполняемых программ, составление переключателей абсолютных модулей, резервирование памяти для общих областей. Предусмотрена работа с библиотечками программ и реализацией функций копирования, обновления, сжатия и заполнения библиотек, а также создания личных библиотек. Кроме того, в программном обеспечении предусматриваются средства для отладки программ и редактирования отлаженных программ, тестирования и диагностики правильности функционирования технических программных средств вычислительной системы.

Операционная система имеет модульную структуру, которая позволяет приспосабливать систему к конкретным конфигурациям технических средств ЕС ЭВМ. Отдельные программные компоненты ОС, а также конкретные функции управляющей программы могут включаться в сво-

зему по желанию пользователя. Процесс создания конкретной структуры ОС, учитывающей особенности ЭВМ и задачи пользователя, называется генерацией системы. Средства генерации системы представляют собой совокупность программ и анализ, позволяющих сгенерировать ОС для своих конкретных целей.

В состав программного обеспечения САПР входят пакеты прикладных программ (ППП), ориентированные на решение определенных задач проектирования и решаемые как надстройка над ОС. Архитектура современных ППП обычно представляется следующим образом. Основу ППП составляет некоторое множество программных модулей, каждый из которых является узкоспециализированной программой некоторого алгоритма или даже его фрагмента. При этом можно проследить следующую аналогичную процедуру проектирования и программирования:

Проектирование объекта	Программирование
Структурное описание объекта	Структура алгоритма
Логическое описание объекта	Структурная схема программы
Детальное описание	Программа
Техническое решение	Программное решение
Проверка	Отладка
Состав компонентов	Алгоритмический язык
Компонент объекта	Оператор языка
Методы решения аналоговых задач	Методы программирования
Технология проектирования	Технология программирования

Из множества программных модулей выделяется подмножество управляющих модулей, составляющих универсальный или специализированный монитор САПР. Программа-монитор САПР организует общий процесс в соответствии с принятым алгоритмом управления.

При проблемной ориентации САПР проектировщику необходимо определить лишь исходные данные, задать вид их обработки и указать форму представления результатов. Для обеспечения этих функций в состав системы должны быть включены входной язык и транслятор с него, прикладные программы проектирования заданного аналогового объекта, программы обработки и вывода результатов в форме, удобной и привычной проектировщику-пользователю САПР. Доступность САПР, главным образом, зависит от возможности языка взаимодействия (его связи с профессиональным языком пользователя), легкости организации вычислительного процесса, наличия вспомогательных сервисных операций, автоматизирующих процедуры накопления и редактирования библиотек.

Возможная структурная схема программного обеспечения такой проблемно-ориентированной САПР (например, САПР проектной организации) изображена на рис. 4.

В основу общей организации такой САПР положен модульный принцип с последовательной работой прикладных программных модулей. Под программным модулем понимается функционально определенная совокупность взаимосвязанных программ (в частности, одна программа), обладающая единой формой межимодульных связей и реализующая некоторую процедуру управления или преобразование информации.

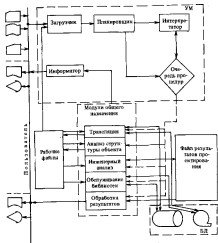


Рис. 4. Структура схемы программного обеспечения САИР

Выбор такой структуры определяется, с одной стороны, стремлением преодолеть ограничения, вызываемые размерами оперативной памяти ЭВМ, с другой стороны, возможностью параллельной (подмодульной) отладки системы. При ограниченных размерах ОЗУ необходима сегментация не только программных модулей, но и входной информации. Каждый модуль системы работает автономно, т. е. считывает входные данные с накопителя на магнитных диске и листе (ИМД или ИМЛ) или устройства ввода с перфокарт (УВПК), обрабатывает их и записывает полученные результаты на ИМД и ИМЛ.

Плавное изменение последовательности выполнения отдельных преданных программных модулей (на основании приоритетов реализуемых ими процедур), распределение памяти, организация ввода и вывода данных осуществляется универсальным монитором (УМ). В состав супервизора

монитор входит программа: „Загрузчик“, „Интерпретатор“, „Информатор“, „Интерпретатор“, „Информатор“ (см. рис. 4). „Загрузчик“ осуществляет ввод входных данных и размещение управляющих и описательных операторов входного языка. „Интерпретатор“ формирует очередь процедур. „Интерпретатор“ содержит средства по выводу и индикации процедур. „Информатор“ сообщает пользователю текущее состояние системы проектирования, а также диагностику ошибок в исходном описании данных. Переключением выше модули постоянно взаимодействуют в оперативной памяти ЭВМ.

Модули общего назначения (см. рис. 4) реализуют процедуры трансляции описательных операторов входного языка, инженерного анализа объекта и оптимизации, обслуживания библиотек системы, обработки результатов проектирования. Модули общего назначения располагаются в архиве системы, организованном на ИМД.

Связь программных модулей осуществляется посредством буферных файлов, помещаемых в промежуточной памяти. В САИР используются два типа буферных файлов: рабочие файлы и файл результатов проектирования. В первых запоминается информация о структуре проектируемого инженерного объекта, типе и параметрах составляющих его элементов (фрагментов); во втором накапливаются данные, генерируемые программой инженерного анализа (моделирование). При переполнении файла результатов выполнения программы проектирования прерывается и выполняются заданные пользователем программы обработки результатов проектирования. После завершения последних возобновляется моделирование до нового заполнения файла результатов и т. д.

Модели инженерных объектов (элементов) и таблицы их характеристик хранятся в соответствующих библиотеках системы. Библиотеки имеют иерархическую структуру, определенную типом используемой памяти: текущая библиотека располагается в памяти с произвольной выборкой (ИМЛ), а постоянная библиотека в памяти с последовательным доступом (ИМЛ). Загрузка в оперативную память и индикация супервизора САИР определяется на языке управления заданиями ОС. После этой связи с системой возможно только с помощью проблемно-ориентированного языка взаимодействия САИР.

Подобная структура позволяет легко наращивать функциональные возможности системы путем расширения набора программных модулей и модифицировать существующие программные модули. Практическую ценность этого качества трудно переоценить, поскольку даже продуманная, тщательно отлаженная система программ всегда содержит ошибки, которые обнаруживаются только при экспериментальных расчетах и в процессе последующей эксплуатации. Модульная структура САИР и специальные средства автоматизации исполнения новых программных модулей позволяют пользователю легко развивать систему и приспосабливать ее под свои задачи.

Система автоматизированного проектирования продолжает постоянно развиваться. Появляются новые вид автоматизированного управления процессом проектирования. В состав САИР вводятся средства идентификации пользователей, исключая от посторонних работ с изменением данных, извещения о необходимости одобрения принятых решений и т. д.

Техническое обеспечение САИР, ориентированное на части ЭВМ, позволяет гибко изменять состав вычислительных средств, подключаемых к ре-

ценно тех или иных задач в каждой системе. Использование замещающих устройств на аппаратных магнитных доменах и лазерного типа значительно расширяет возможности записи, хранения и выдачи информации. Другим новшеством будет использование в составе сетей ЭВМ вычислительной техники, ориентированной на аппаратное выполнение ряда функций, которые в настоящее время выполняются программно. Значительно расширится возможность воспроизводства оборудования. Появятся цинкохромные диски, увеличатся значительные объемы буферной памяти.

5.1.3. Пакеты прикладных программ

Уже при использовании ЭВМ первого поколения стали накапливаться наборы наиболее часто встречающихся программ. Такие программы, разработанные с учетом требований совместности и единообразия использования, стали группировать в пакеты программ. На первом этапе основной задачей программистов было обеспечение информационной совместности программ одного пакета. Это достигалось в основном за счет приращения информации одинакового назначения и той же формы представления. Для использования ППП применительно к определенному набору задач необходимо было вручную выбирать подсистемы программы по каталогу и составлять головную программу, управляющую их работой. Такие ППП применяются и в настоящее время в тех случаях, когда пользуются большим числом программ, причем частота использования каждой отдельной программы невелика.

Второй этап развития ППП относится к середине 70-х гг., когда были автоматизированы ввод и сборка ПМ путем введения в ППП монитор-исполнительской системы, использующей язык машинных кодов системы для набора нужных данному расчету ПМ. В качестве нового компонента ППП на этом этапе оказался язык структурированных данных. Такое усовершенствование упростило использование ППП, позволило сократить объем данных, вводимых для решения каждой задачи, примерно в 2 раза. Подобный пакет сейчас в § 3.3 и дан в прил. 1 под названием „Далит“.

Следующим этапом в области организации программного обеспечения является создание ППП с генерацией программ, в которых монитор-исполнительская система не только осуществляет связь между ПМ, но и определяет, какие модули необходимы для решения конкретной судостроительной задачи. Пользователь дает только описание задачи, которое передается монитор-исполнительской системой с языком пакета на язык программирования и приобретает вид программы для решения этой задачи.

В последнее время в ряде зарубежных САПР (например, в системах CASDAC и „Seahill“) созданы монитор-исполнительские системы, которые можно рассматривать и как средство взаимодействия САПР, обеспечивающее запоминание новых сведений в виде смысловой (семантической) модели и информации о решаемой задаче. На этой стадии развития программного обеспечения делается попытка приблизить вводной язык

пакетов к естественному языку и вводится режим диалога для работы с пакетами программ.

Важным фактором дальнейшей автоматизации проектирования в 70-х гг. было появление мини-ЭВМ, которые при значительно меньших размерах и стоимости обладают примерно такими же возможностями, что и большие ЭВМ 60-х гг. Мини-ЭВМ устанавливаются в любом помещении, отличаются надежностью и простотой обслуживания. Основой прикладного программного обеспечения таких машин являются ППП.

Можно определить ППП как совокупность программ, совместных по структуре данных и способам управления, объединенных общностью функционального назначения как средства решения определенного круга задач. Обычно ППП рассчитан на конкретный круг пользователей. Существуют ППП „Дростроирование судов“, осуществляющие оптимизацию определенных классов судов, ППП „Лазово-технологическая подготовка верфи“, ППП для обработки графической информации и т. д.

По характеру решаемых задач можно выделить три группы ППП: системные пакеты, расширяющие возможности операционных систем по организации работы многопроцессорных вычислительных комплексов; универсальные пакеты, предназначенные для решения вычислительных задач в различных областях судостроения; специализированные пакеты, предназначенные для решения прикладных задач судостроения.

Рассмотрим несколько примеров позиций ППП.

Особенно больших затрат труда требует создание пакетов программы машинной графики, обеспечивающих работу в диалоговом (атрагивном) режиме. Такие пакеты помимо собственно прикладных программ содержат программы управления диалогом, программы построения и преобразования графических изображений, программы формирования и обработки директив пользователей. В СССР разработкой и эксплуатируется ряд программ машинной графики в области машиностроения и радиотехники. К числу пакетов машинной графики в судостроении относятся ППП „Астра“, предназначенный для автоматизированной обработки документации по судовым трубопроводам. С помощью этого пакета возможно получение следующей документации: альбомов картоэскизов элементов труб; спецификаций к этим альбомам; спецификаций на монтаж трубопроводов; расчета координат центра тяжести по каждому чертежу; ведомостей на изоляцию труб и арматуры; ведомостей на оптимизацию планов; ведомостей на заказ арматуры; материалов и труб по стадии технического проекта; расчетные таблицы статистических данных по выданным с помощью ЭВМ рабочим чертежам трубопроводов; расчеты трудоемкости рабочего чертежа по трубопроводам; исходных данных для выпуска документации с помощью ЭВМ. Работа с пакетом возможна при наличии следующих средств вычислительной техники: ЭВМ ЕС-1022 с операционной памятью объемом 512 кбайт; двух НМД ЕС-5061; двух НМД ЕС-5010; алфавитно-цифрового печатающего устройства ЕС-7032. В качестве языка программирования использовались АСSEMBLER, ПЛ1 и ФОРТРАН-4. Исполнительные работы в области автоматизации графических работ ведутся в зарубежном судостроении, что обусловлено аналогичностью подготовки чертежно-конструкторской документации.

По данным работы [36] о работе четырехзвонных японских фирм суммарная трудоемкость проектирования механических деталей судов достигает 10—60 тыс. т находится в пределах 6—12 тыс. чел.ч. Из них 75% приходится на разработку документации по общему расположению, системам и трубопроводам, 2,3% — на подготовку чертежей оборудования помещений, 2% — на подготовку монтажных чертежей.

Примерами прикладных пакетов для автоматизации проектных расчетов могут служить ППП „Rocky“ (ФРГ) и „Hilde“ (США) [36].

Первый из них разработан фирмой „Felder Werff“ и „Werff Neb“. Он включает 56 ПМ суточных расчетов. К числу важнейших относятся модули BON, HYD, PANTO, предназначенные для построения масштаба Бонжана, кренных элементов теоретического чертежа и палубы; модуль TRIST, предназначенный для расчетов осебенности; модуль OPTI, оптимизирующий распределение килейлеров. Имеются модули непотопляемости, продольной прочности, сопротивления, скорости, оптимизации двингов и т. д. Последовательность выполнения ПМ формируется автоматически и происходит в пакетном режиме. Проектант следит за ходом расчетов с помощью алфавитно-цифрового дисплея.

Если конечные или промежуточные результаты не удовлетворяют установленным требованиям, расчет приостанавливается и повторяется после изменения исходных данных. Пакет „Rocky“ ориентирован на использование в качестве центральных устройств портативных ЭВМ „Hewlett Packard 9845A и 9845T“. ППП „Hilde“ разработан фирмой „Boeing“ для автоматизированного проектирования судов на воздушных кранах. Включает 16 ПМ, мониториро-исполнительную систему и программу формирования текущей модели судна. Каждый ПМ состоит из подпрограммы трех типов: начальной, синтезирующей и анализирующей. Начальная программа с помощью простых математических соотношений проводит различные проектные расчеты, которые служат основой для дальнейших вычислений по синтезирующим программам. С помощью последних методов итераций выявляются уточненные характеристики теоретического чертежа корпуса и краневой системы, элементы двингового комплекта при ходе на крановых и на палубе, масса отдельных составляющих нарузки и т. д. Синтезирующие программы постоянно взаимодействуют с „текущей моделью“ судна (начальной программой) и корректируют ее. Анализирующие программы не взаимодействуют с „текущей моделью“, а позволяют проектанту получать о ней подробную информацию. Конструктор имеет возможность управлять процессом проектирования с помощью мониториро-исполнительной системы, анализируя ход процесса сопоставлением полученных результатов с информацией, хранящейся в БД и полученной при проектировании других судов на воздушных кранах. Опыт эксплуатации пакета показал, что экономия затрат инженерного труда достигает для отдельных проектов 90% общего объема проектных работ [36].

Таким образом, в области прикладного программного обеспечения на своем отдельном разрабатываемом программном принципе ППП, включающие в себя десятки, а иногда и сотни ПМ и управляемые едиными мониториро-исполнительными системами.

5.1.4. Средства общения и диалоговые подпрограммы

Важнейшим элементом любой САПР является пользовательские системы. Различные группы пользователей предъявляют неодинаковые требования к организации процесса взаимодействия. Это зависит от их знаний, творческих способностей и усердия. В связи с этим существуетделение уровня пользователей. К первому уровню относятся сами разработчики САПР. Ко второму — те, кто хорошо знает построение системы и может внести в него изменения; изменять содержимое библиотек, встраивать свои собственные прикладные программные модули в таком образом совершенствовать процесс проектирования, видоизменять его для новых задач. К третьему уровню относятся пользователи, работающие в системе с помощью ориентированного на них языка взаимодействия. Процесс проектирования в этом случае сводится к заданию исходных данных, постановке задачи исследования, проведение расчетов, акцепту результатов, принятию решения, заключающегося в изменении исходных данных или промежуточных параметров. Четкой границы между указанными уровнями пользователей провести невозможно, однако опыт внедрения САПР показывает, что большинство пользователей в проектных организациях относится к третьему уровню. Поэтому при работе в САПР необходимо обеспечивать тесное взаимодействие всех активных участников разработки и эксплуатации системы: проектировщика, оператора ЭВМ и внешних устройств, программиста, оператора банка данных и администратора САПР.

Основными преимуществами в настоящее время режимами работы вычислительных систем, определяющими способ организации взаимодействия пользователей с ЭВМ, являются режимы пакетной обработки данных и разделения времени.

В режиме пакетной обработки информации пользователь не имеет непосредственного доступа к ЭВМ, при этом процесс взаимодействия развивается на следующие этапы:

- описание проектируемого объекта на входном языке и определение необходимых процедур решения задачи проектирования;
- передача описаний (бланков с программами) на перфореоание;
- перфореоание;
- передача пакета перфокарт на операторное обслуживание;
- выполнение задачи проектирования на ЭВМ;
- передача результатов пользователю;
- анализ результатов.

Первый и последний этапы выполняет сам пользователь. Время решения технической задачи определяется длительностью третьего—шестого этапов и зависит от организации работ на конкретном вычислительном центре. В среднем оно может занимать от 2—4 ч до нескольких суток.

В режиме разделения времени пользователь с помощью терминала непосредственно изменяет массивы исходных данных и управляет процессом решения. Если решение получается в реальном масштабе времени, то такой режим называют диалоговым. Процесс взаимодействия при этом состоит из следующих этапов:

описание ивектерного объекта на вкладном языке;
передача описаний на перфорированной;
перфорированной;
основ непосредственного взаимодействия с ЭВМ.

Первый-третий этапы выполняются при первичной подготовке исходных данных и в последующих сеансах взаимодействия могут отсутствовать. Длительность сеанса взаимодействия зависит от опыта пользователя и класса решаемых задач. Как правило время उपयोगности пользователя она не превышает 2 ч.

Наиболее удобным устройством ввода/вывода для диалогового подсистем является экранный вывод (дисплей), связанный с каким-либо устройством документирования. Основным преимуществом диалогового режима является легкость внесения изменений в данные. Если в заданном режиме структуры входных данных обычно фиксируются и данные вводятся в определенной последовательности, то в диалоговом режиме процесс ввода ограничен только наличием базовых операций ввода: добавление, исключение, корректировка данных. Эти операции в свою очередь обладают гибкой командной структурой и предусматривают изменение не только задачи в целом, но и отдельных ее элементов. При обработке результатов вычислений преимуществом диалогового режима являются в том, что можно легко выборочно просмотреть результаты, а затем определить объем вывода; контролировать объем вывода; воспользоваться упрощенными форматами вывода для предварительного просмотра результатов; определить набор процедур проектирования на основании текущих результатов.

Подготовка и редактирование массивов исходных данных, а также реализация графических процедур вывода результатов анализа выполняются сравнительно быстро, поскольку при этом не используются графические операции. Дисплей снабжен устройством обратной связи в виде спящего зеркала и светового пера, а также функциональной клавиатуры, позволяющей оперировать с графическими изображениями. Комбинировать возможности светового пера и клавиатуры, проекторщик вводит в ЭВМ через экран дисплея первоначальный замысел будущей конструкции объекта, а затем с помощью ЭВМ совершенствует ее и декларирует. Для графического диалога эффективно используются дисплеи на запоминающих трубках и спидрианые планшеты с координатной сеткой и указателем, позволяющим вводить значения координат в ЭВМ.

Диалоговый режим наиболее эффективен при подготовке исходных данных и при решении различных оптимизационных задач.

Комбинированным режимом является режим дистанционной пакетной обработки. В этом режиме экранные пункты используются исключительно для целей автономного ввода/вывода.

Значительное влияние на организацию диалогового взаимодействия оказывает вычислительное оборудование. Современный эффективный комплекс технических средств для реализации диалогового режима работы проекторщика обычно содержит (рис. 5):

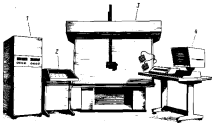


Рис. 5. Комплекс технических средств для реализации диалогового режима

малую специализированную или универсальную вычислительную машину со своим набором устройств ввода-вывода аналого-цифровой информации, обеспечивающую управление работой всего комплекса технических средств, а также реализацию функциональных программ обработки графической информации (1);

устройства вывода графической информации (планшеты, дуплициры), предназначенные для документирования промежуточных и окончательных графических результатов проектирования (2);

устройства автоматического и полуавтоматического ввода графической информации (кодировщики), используемые для оперативного ввода графической информации (3);

устройства оперативного графического взаимодействия (проекторщик с машиной (дисплеи), предназначенные для отображения промежуточных графических результатов и их оперативной корректировки (4).

В настоящее время серийно выпускаются автономные дисковые вычислительные подсистемы, построенные на базе малых ЭВМ (типа СМ ЭВМ) и предназначенные для автоматизации проектирования в различных отраслях промышленности. Примером может служить автоматизированное рабочее место проекторщика в машиностроении (АРМ-М).

Комплекс АРМ-М представляет собой совокупность технических и программных средств для организации диалогового режима проектирования изделий машиностроения, а также для выполнения различных работ, связанных с входом-выводом, редактированием графической и текстовой информации. Ядром комплекса является мини-ЭВМ типа «Мир-4» или СМ-3. Процессор мини-ЭВМ связан общей шиной как с периферийным оборудованием, так и с процессором большой ЭВМ. Прямой доступ к оперативной памяти обеспечивается НМД и графический дисплей (ЭПГ-400). Общесистемное математическое обеспечение АРМ-М

на базе дисковой ОС с четырьмя разделами мультипрограммирования обеспечивает возможность модификации аппаратных средств комплекса, ввода и вывода графических данных, проведения определенного объема вычислительных работ, подготовки информации для дальнейшей передачи ее на большую ЭВМ, отображения на дисплее и вывода результатов на графопроектор; выпуска документации: корректировки и редактирования текстовой и смешанной информации; ввода типовых элементов в библиотеку и их редактирование.

Язык взаимодействия является средством, обеспечивающим контакт пользователя с вычислительной системой и упорядочивающим процесс автоматизированного проектирования. Он должен быть выразительным, простым в использовании; обладать гибкостью, позволяющей применять его для решения широкого класса задач; обладать проблемной ориентацией, заключающейся в применении в конструктивных языках понятий, применяемых проектировщику. Язык взаимодействия пользователя с ЭВМ является важнейшей составной частью САПР и должен обладать многими качествами, присущими универсальным языкам программирования. Однако применение универсальных языков типа АЛГОЛ, ФОРТРАН, ПЛ/1 в некоторой конкретной области проектирования громоздко и неудобно. Альтернативой этому подходу является создание проблемно-ориентированных языков и трансляторов к ним. Здесь предпочтителен подход к построению языка, исходящий из основных операций и структур данных, характерных для соответствующей области применения. Любой язык есть знаковая система, описание которой задается алфавитом, словарем и синтаксисом, с помощью которых выражается входная информация. Обычно используют алфавит, состоящий из цифр, букв, знаков препинания, логических и арифметических операций.

Словарь определяется перечнем используемых в языке слов и правил их построения. Слово представляет набор символов из алфавита.

Синтаксис определяет набор правил объединения слов в предложения. Различают бесформатные (контекстно-свободные) языки, допускающие произвольное расположение слов в предложении, и форматные (контекстно-связанные) языки с жесткой структурой предложений. Кроме того, различают помеченный язык, значения слов в котором зависят от занимаемого места в предложении, и дескрипторный язык, значения слов в котором оговорены заранее и отражены в трансляторе.

Семантика определяет набор правил, позволяющих ЭВМ правильно оценивать смысл анализируемого предложения, а практика — набор правил, устанавливающих связь между входным текстом и состоянием элементов технического комплекса.

Язык взаимодействия пользователя с ЭВМ можно в общем случае представить совокупностью трех взаимосвязанных языков:

- описание объекта проектирования (структуры входных данных);
- управления вычислительным процессом, т. е. описание требуемых действий ЭВМ для решения технической задачи;
- описанией САПР, с помощью которых пользователь получает сведения о состоянии данных и возможных режимах использования системы.

Очевидно, что реализация проблемно-ориентированного языка требует высокой квалификации программистов и представляет собой достаточно сложную задачу. Поэтому в настоящее время ведутся разработки системно-ориентированных трансляторов, которые смогли бы автоматически настроиться на формальное описание синтаксиса и семантики нужного языка и тем самым существенно упростить создание конкретных языков для аппаратуры САПР.

3 1.5. Организация проектно-конструкторских работ в традиционной и автоматизированной системах проектирования

От организации процесса проектирования в большой степени зависит качество проекта и сроки его разработки. Проектирование сложной системы органически нельзя выполнить в один прием, поскольку необходимо последовательное решение проблематики, решения задачи и ее синтеза. Сборка частных результатов в единое целое позволяет оценить свойства системы после принятия ряда решений, затем при необходимости можно ввести корректировки в частные решения и повторить синтез и оценку свойств системы. И так до тех пор, пока не будет построена система с нужными свойствами. На рис. 6 приведено схема одного цикла последовательных приближений. Получив задание на проектирование, подбирают прототип или создают контрольный, промежуточный прототип. Модифицируя его, получают первое решение, которое анализируют, проверяя соблюдение всех заданных ограничений. При необходимости корректируют элементы сооружения. Затем результат оценивают по основному критерию. Если оценка удовлетворительна, расчет заканчивают и оформляют итоговую документацию. В промежуточном случае вводят коррективы, которые дают прототип следующего поколения, и процесс повторяется. Такая последовательность работ может быть принята как для какого-то отдельного расчета, так и для всей цепи расчетов при определении элементов судна. Проход по цепи дает одно приближение (итерацию). Число приближений зависит от оценки результата. На каждом этапе приближений повторяются многие расчеты (нагрузки, ходкость, остойчивость, вместимость, высота борта и др.). Такую последовательность работ часто называют спиралью проектирования. Резкое увеличение вычислительных возможностей проектировщиков благодаря ЭВМ позволяет на базе системного подхода построить процесс проектирования в виде многоуровневой задачи с выбором наилучших решений как по судну в целом, так и по отдельным его частям.

В разработке проекта судна принимают участие большие числа проектирующих организаций-контракторов. Каждая из участников в первом проектировании вносит свои коррективы, скоординированный учет которых представляет большие трудности, несовершенство — серьезно отражается на качестве проекта. Отношение объема проектных работ контракторов к объему собственных работ проектиста судна в конце 70-х гг. составляло 10:1 [58]. Такое положение означает, что изменение веса

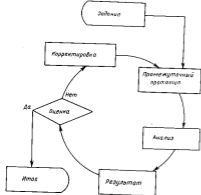


Рис. 6. Каким образом проектируются

контрагентами своей документацией на 5% может привести к необходимости изменения документации проекта на 50%. Это обстоятельство требует особенно четкой работы отделов ЦКБ с контрагентами-разработчиками основного конструктивного оборудования в части своевременного получения всех необходимых данных для корректировки проекта. Очень важна своевременная учет и ввод всего необходимого для постройки судна. Для этого у проекта должны существовать специализированный отдел заказа и комплектации изделий и материалов, который на основании введенной конструкторских подразделений бюро-проектанта составили бы ведомости заказа, комплектации и снабжения, согласуя их с базисной организацией. В этом же отделе должен быть координационный центр, где собираются бы все необходимые информации о работе контрагентов. Все это свидетельствует о чрезвычайной сложности процесса проектирования судна и о трудностях, которые возникают на пути автоматизации этого процесса.

1.5.1. Стадии традиционного проектирования судов

Конечная цель проектирования — создание документации, необходимой для постройки и эксплуатации судна. Знаменитый русский

кораблестроитель И. Г. Бубнов так охарактеризовал эту задачу: „Внез готовых чертежи и нагрузку судна, мы в большинстве случаев можем установить какими именно заданными будет удовлетворять построенное по этим чертежам судно; многоэтапные и часто очень сложные расчеты, которые нужно провести для этого, и представляют предмет теории корабля, строительной механики корабля, электротехники и разных других разделов общевойсковой науки кораблестроения. Проектирование ставит нам образную задачу — создать чертежи судна, удовлетворяющего определенным заданием. Легко понять, насколько трудна и сложна эта задача по сравнению с первой” *. Это было сказано семидесять лет назад и тем более справедливо для современного судостроения. Ввиду сложности задачи проектирования судна, в которой не представляется возможным учесть сразу все обстоятельства, влияющие на размеры судна, его коэффициенты, формы и другие элементы, неизбежно познание развития проекта, постепенный переход от простого обобщенного представления о судне к более полному и детальному представлению. Процесс проектирования судна в связи с этим распадается на взаимосвязанные стадии (в соответствии с ГОСТ 2-103-68):

- техническое задание (исследовательское проектирование);
- техническое предложение (автпроект, предпроектный проект);
- эскизный проект;
- технический проект;
- рабочая документация.

Для того чтобы была понята сложность автоматизации проектирования судна, рассмотрим содержание каждой стадии подробнее.

1.5.2. Техническое задание

При составлении планов развития народного хозяйства страны выделяют задания (переходя грузы и пассажиры, бурение скважин в морском дне, управление полетом спутников и т. д.), решение которых возможно средствами судостроения. Поэтому уже в процессе планирования приходится устанавливать некоторые характеристики новых судов и их количество, исходя из потребностей хозяйственного развития страны, состояния судостроительной техники и перспектив ее развития. Применительно к каждому новому судну процесс проектирования начинается с разработки требований к нему, которая проводится заказчиком судна с привлечением научно-исследовательских организаций. Заказчик — это организация, которая после постройки судна принимает его, а затем эксплуатирует. В СССР основными заказчиками являются Министерство обороны, Министерство морского флота (ММФ), Министерство рыбного хозяйства (МРХ), Министерство речного флота (МРФ) и Президиум Академии наук СССР. Иногда в роли заказчика выступает более мелкая организация, например одно из пароходов ММФ или одно из главных управлений ВМФ. За границей заказчиком может быть любая фирма.

*Алекс. В. В. Проектирование судов. Л., 1974, с. 9.

Успех проектирования на данной стадии и значительной мере зависит от достоверности исходных данных, широты кругозора и опыта коллектива, которому поручена работа.

Если речь идет о транспортном судне, то последует транспортная схема с целью определения диапазона экономически обоснованных значений грузоподъемности, пассажироплотности или какого-то другого показателя, зависящего от назначения судна. Основой исследования служат данные о существующих и перспективных грузоотках, о расстояниях уже построенных судов по эксплуатационным линиям и по видам выполняемых ими работ. В процессе исследования транспортной схемы обосновывается скорость судна, выдвигаются ограничения его размеров (например, по условиям прохода каналами или под мостами), требования к бытовым системам, отопительным установкам и т. п. Результаты этой большой исследовательской работы, проводимой заказчиком, фиксируются в техническом задании, которое содержит следующие сведения:

указание на целевое назначение судна в виде отнесенных задач и их сочетаний, которые оно должно решать;

характеристику предполагаемых условий эксплуатации (район плавания, взаимодействие с другими объектами, обслуживание, срок службы);

- грузоподъемность и пассажироплотность;
- дальность плавания;
- скорость;
- автономность;
- предпочтительный тип энергетической установки и род топлива;
- требования к оборудованию, при помощи которого будут решаться задачи, обусловленные назначением судна;
- список ведомств, нормативные требования которых должны быть удовлетворены (например, по надежности, обитаемости и т. д.);
- эксплуатационные ограничения элементов судна (например, осадки, длины);
- предполагаемое число судов в серии;
- желательную численность экипажа;
- уровень автоматизации производственных процессов;
- пределы стоимости судна и его экономических показателей.

1.5.3. Техническое предложение

Утверждение технического задания передается проектирующей судна для разработки на его основании технического предложения. Главная цель выполнения которого заключается в подтверждении осуществимости проектного замысла. Сущностными элементами являются: описание технических характеристик судна;

проверка их соответствия современным уровням техники судостроения и условиям эксплуатации;

определение мероприятий, проведение которых необходимо при создании судна.

Для достижения перечисленных целей выполняются следующие работы:

проверяет совместимость требований заказчика к судну;

проверяет правильность назначения скорости (при малой скорости используется малооборотный главный двигатель, а судно оказывается неспособным идти против ветра и волнения; например, первые советские ледоколы по этой причине не могли ходить в Ленинград при сильном восточном ветре; иногда конструкторы предлагают большие значения скорости по условиям использования судов в зимнее время);

устанавливают возможность комплектации судна основным оборудованием и выявляют необходимость разработки новых видов оборудования или закупки их за рубежом;

выявляют требующиеся научно-исследовательские, опытно-конструкторские и монтажные работы, а также состав исполнителей проекта.

Не исключено, что результатом разработки технического предложения может оказаться вывод о целесообразности создания судна вообще либо о невозможности осуществления замысла по конструктивным соображениям, либо о необходимости доработки разработок в другом направлении. Все эти работы выполняются в нескольких вариантах, решение которых могут определяться способом погрузки — разгрузки, типом энергетической установки, размещением основного оборудования и т. д. Глубина проработок должна быть такой, чтобы можно было сравнивать варианты по экономическим, технологическим, эстетическим и другим показателям для обоснования выбора предпочтительного варианта.

От технических решений, заложенных в проект, зависит уровень народнохозяйственных затрат на транспортировку грузов морем в течение десятков лет. Отсюда следует, что новые суда необходимо проектировать и строить с учетом достижений научно-технического прогресса в судостроении, машиностроении, металлургии, приборостроении и других отраслях промышленности. По основным техническим и экономическим показателям вновь проектируемые суда должны превосходить суда, находящиеся в эксплуатации и построенные. Если в процессе проектирования этого добиться не удалось, то спроектированное судно не имеет смысла строить, ибо оно очень быстро морально устаревает и не окупит затрат на свою постройку и эксплуатацию.

При проработке возможных вариантов судов учитываются производственно-технические требования, важнейшие из которых таковы:

при постройке судов необходимо применять материалы, обеспечивающие минимальную массу корпусных конструкций при высокой трудоемкости их обработки;

а максимально возможным объемом следует использовать стандартные и нормализованные детали, узлы, комплект, с тем чтобы значительно сократить стоимость и сроки постройки судов;

важно обеспечить возможность постройки судов с использованием средств производства, которые имеются на судостроительных заводах или могут быть созданы в ближайшем будущем.

Производственные возможности заводов могут ограничивать некоторые элементы судна. Например, длина и ширина стапелей ограничивают длину и ширину судна; весудат способность стапеля ограничивает грузовой вес и, следовательно, водоизмещение судна. Габариты и водоизмещение судна ограничиваются и размерами сухих и плавучих доков. Так, во второй мировой войне самый большой сухой док (в Сентавуре) имел длину 305 м. Значит, в то время нельзя было строить супертанкеры, ибо их негде было бы ремонтировать.

Иногда после подробных проработок в заданное время изменяются и уточняются с согласия заказчика. Результаты этой работы фиксируются в комплексе технической документацией, в который входят:

- расчет главных размерений судна;
- расчет мощности главных двигателей и электростанции;
- теоретический чертеж;
- схема общего расположения;
- укрупненная раскладка масс (нагрузки судна);
- перечень основного оборудования;
- конфигурация экипажа;
- расчет стоимости судна и расходов по его эксплуатации;
- перечень необходимых опытно-конструкторских и научно-исследовательских работ;

объемная записка с обоснованием рекомендуемых способов удовлетворения требований технического задания.

Объем технического предложения обеспечивает возможность выдачи заданий основанностям и контрагентам сразу после его утверждения.

1.5.4. Эскизный проект

На основании технического предложения разрабатывается эскизный проект, в котором проявляются основные технические решения, определяющие облик судна как транспортного, промышленного или какого-либо иного средства. К числу таких решений относятся определение главных элементов, компоновка общего расположения, выбор конкретной энергетической установки и трювого оборудования, ее основного заказчика, степень автоматизации, материал корпуса и постройки и т. д.

В эскижном проекте строят основные элементы теоретического чертежа, исследуют остойчивость судна в нормальном и поврежденном состоянии, изготавливают модель судна для уточнения скорости путем испытания в бассейне, разрабатывают конструкцию корпуса, рассчитывают общую продольную прочность, обосновывают главные технологические решения.

В итоге эскизный проект должен подтвердить наличие материальных условий для создания судна и нормального его эксплуатации после постройки. На стадии эскижного проектирования в работу вступает уже большая коллекция специалистов по отдельным подсистемам и основному комплексу судового оборудования. На этой стадии решаются многие вопросы, которые не рассматривались в техническом предложении.

Вместе с тем логично рассмотреть эскизный проект как новый этап проектирования или уточнения основных технических решений.

Иногда все перечисленные разработки ведутся в пяти-шести вариантах. В этом случае самостоятельная оценка проработанных вариантов осуществляется не самой проектной организацией, а в совместном заседании или специально назначенным экспертом. Для принятия к дальнейшей проработке варианта устанавливается примерно следующее содержание эскижного проекта:

объемная записка, в которую входят техническое предложение, обоснование выбора типа судна и его механизмов, обоснование главных размерений, мотивировка отступлений от технического предложения;

- теоретический чертеж;
- чертеж общего расположения (продольный разрез, планы палуб и платформ, трюм, двари поперечных сечения, общее расположение машинных и котельных отделений);
- конструктивный мидель-шипиут;
- принципиальная схема судовых устройств и систем;
- расчеты звукоусиления, остойчивости и негодности;
- расчет приближенными методами сопротивления воды и трюбого веса;

- расчет нагрузки (раскладка масс);
- расчет общей прочности;
- принципиальная схема электрооборудования;
- принципиальная технология постройки судна;
- классификация судна по всем частям (корпусной, механической, специализированного оборудования и т. д.);
- укрупненная калькуляция стоимости постройки судна.

Основная организационная проблема этапа эскижного проектирования состоит в организации системного подхода к проектированию, либо подсистем на базе согласованного и утвержденного технического задания через четкие технические задания контрагентам, а также в координации работ по оптимизации отдельных подсистем судна внутри ЦКБ-проектанта. Другой важной проблемой этого этапа является выполнение в проекте принципов модульно-аргетного метода (МММ) проектирования и строительства судна [58].

По утвержденному варианту эскижного проекта принимается решение о постройке судна и разработке технического проекта. Одновременно утверждаются перечень основных элементов судна и перечень мероприятий, обеспечивающих разработку технического проекта. Окончательно уточняется завод-строитель, готовятся решения вышестоящей межведомственной организации об участии контрагентов в работах по техническому проекту судна, а также о проведении опытно-конструкторских и научно-исследовательских работ. Устанавливаются сроки проектирования, строительства и сдачи судна заказчику.

По окончании работ по эскижному проекту уже определена комплектация оборудования, изготовление которого возможно в машиностроительных цехах завода-строителя судна (МСЗ — машиностроитель-

ная часть): оставлен перечень оборудования, которое могут поставлять заводу смежные предприятия отрасли по межзаводской кооперации (МЗК); имеется перечень оборудования, которое необходимо будет изготовить на предельных другаях отраслей (контрагентам).

1.5.5. Технический проект

Технический проект, являющийся последним этапом творческих проектных работ, выполняется в одном варианте, соответствующем утвержденному варианту эскизного проекта. Одобренный вариант эскизного проекта фиксирует важнейшие элементы судна — конструктивный тип, главные размеры, принципиальную схему общего расположения и т. п., которые обеспечивают ему требуемые эксплуатационные и мореходные качества. Основное содержание технического проектирования — претворение принятых решений эскизного проекта в конструктивные схемы отдельных частей корпуса и механизмов при сохранении качества, предусмотренных эскизным проектом.

Технический проект содержит окончательные технические решения, дающие полное представление о судне, об объеме необходимой для его постройки кооперации, и все исходные данные для создания рабочей документации. В связи с этим все конструктивные элементы в проекте указывают в объеме, обеспечивающем их взаимное согласование; оборудование в наилучших помещаемых размерах методом объемного моделирования. Много внимания уделяют всевозможным проверочным расчетам. Разрабатывают принципиальную технологию и передают ее специализированным КБ, которое, таким образом, становится контрагентом в проектировании судна. Помимо и одновременное выполнение требующихся контрагентских работ, согласование заданий и получение принципиальных решений на их выполнение — обязательное условие нормального проектирования судна. Это видно хотя бы из того, что стоимость контрагентского оборудования и работ превышает половину стоимости судна. На основании заданий специализированных КБ специализированные КБ разрабатывают требуемое оборудование и перечисляют условия на него, в которых указывается: характеристики, необходимые для разработки установочных чертежей, сведения о порядке испытаний в связи с оборудованием, ресурс работы, ремонтопригодность и некоторые другие сведения. Как правило, утвержденные технические условия проектант судна получает не позже окончания технического проекта. В результате технического проектирования выпускается комплект документации, называемый техническим проектом судна. Он содержит подробные чертежи общего расположения; теоретический чертеж, откорректированный по результатам испытаний в бассейне; спецификации по всем частям судна; конструктивные чертежи мидель-шпангоута, надстроек, фундаментов, мачт и др., а также обязательную записку с обоснованием данных, послуживших в основу разработки проекта, мотивировкой отсутствия от утвержденного эскизного проекта и кратко излагаям полученные результаты. Естественно, объем технического проекта значительно больше объема эскизного.

Технический проект согласовывают с Регистром СССР, ЦК профсоюзных заводов, Министерством здравоохранения и другими ведомствами, которые указаны в техническом задании. Затем он утверждается заказчиком. В проект вносят изменения по замечаниям привлеченных организаций и составляют договорную спецификацию, которая содержит описание судна в целом и отдельных его конструкций, систем, устройств. Спецификация — важнейший из всех официальных документов, прилагаемых к договору на постройку судна. Составление договорной спецификации — чрезвычайно ответственное дело, требующее исключительной продуманной формулировки каждой фразы, чтобы не было неясностей, недомолвок, пропусков существенных для заказываемого судна требований. Спецификация не должна содержать требований, которые завод-строитель не в состоянии выполнить.

1.5.6. Рабочая документация

Рабочая документация — конечная цель процесса проектирования. Она позволяет организовать процесс обработки материалов, монтаж оборудования, сборку корпуса на стапеле, спуск судна, его испытания в силу заказчика. После утверждения технического проекта пожелают отправки точки по всем частям судна. Теперь большое внимание уделяют узким общим расположениям отдельных конструкций и их деталей. Основной упор делают не на внешние моменты, а на выполнение проектных работ в календарные сроки с максимальной трудоемкостью. Такой подход к рабочему проекту достигается огромным количеством документов, входящих в его состав.

Условно рабочую документацию по судну можно разделить на следующие части: рабочие чертежи, технологическую часть, технические условия, спецификации, слесарную и эксплуатационную документацию.

На рабочих чертежах, составляющих основную часть рабочего проекта, изображают детали судна, за исключением изделий, поставленных контрагентами. По этим чертежам изготовляют все детали и узлы корпуса и производят их сборку, а затем устанавливают и контрагентские изделия. Цикл разработки рабочего проекта современного крупного судна составляет от 18 до 36 мес и в зависимости от водоизмещения и типа судна включает изготовление от 25 до 100 тысяч чертежей, приведенных к формату 24. Из-за длительного цикла разработки чертежей и быстрого морального старения современной техники строительство судна приходится начинать до окончания разработки всех рабочих чертежей.

В этих условиях ЦКБ-проектнику необходимо справиться с тремя большими задачами: обеспечить завод-строитель рабочими чертежами в соответствии с генеральным графиком создания судна; обеспечить высокое качество чертежей; организовать авторский надзор и техническую помощь на заводе-строителе.

В зависимости от принятой на заводе технологии постройки судна ЦКБ должно выпускать рабочие чертежи по районам или технологическим комплексам (блокам, модулям) в соответствии с почерковыми графиками, согласованными с заводом-строителем, в основе которого

ложит генеральной график построения судна. При этом следует учитывать технологию построения работ завода, время, необходимое на подготовку производства; изготовлены оснастки, послели, кондукторы, а также возможность начала работ в металлообрабатывающих цехах завода одновременно с началом обработки металла и изготовлением секций. При согласовании сроков поставки рабочей документации заводу принимается во внимание, что на обработку чертежей в КБ и технологических служб завода уходит от трех до шести месяцев.

Качество проекта характеризуется не только уровнем проектных и конструкторских решений, но и качеством оформления. Если качество проектных решений оказывает влияние на эксплуатационно-экономические показатели судна, то от качества конструкторской документации прежде всего зависит организация труда на заводе. Опыт проектно-конструкторских работ показывает, что невозможно рассчитывать на слабые стороны документации по главному судну, так как в связи с совершенствованием проекта во время выпуска чертежей и быстрым старением техники необходимы коррективы уже законченной документации. Количество изменений в рабочей документации по разным причинам (58) примерно распределяется следующим образом: решения заказчика — 15%, изменение условий поставки — 15%, изменение ГОСТов и нормативной документации — 5%, повышение уровня унификации проектных решений — 3%, технологические улучшения — 5%, усовершенствование и доработка новых конструкций — 30%, усовершенствование по рационализаторским предложениям — 3%, результаты модернизации и испытаний — 4%, по актам завода — 10%.

В период строительства заказчик часто предъявляет заводу дополнительные, не предусмотренные договорной документацией требования, направленные на улучшение некоторых характеристик судна. Оперативные группы и руководители проекта тщательно рассматривают такие предложения и выносят решение о возможности и целесообразности их принятия. Все принятые изменения в документации после проработки утверждаются главным конструктором. Одних рабочих чертежей для постройки судна недостаточно. Необходимо еще сведения о методах изготовления и сборки деталей в узлы, о привнесении при этом оборудования, о последовательности выгрузки крупногабаритного оборудования на судно и т. п. Эти сведения и содержится в технологической части проекта, значительная доля которой создается на заводе-строителе.

На основании рабочих чертежей и производственной технологии постройки судна, выпущенных проектантом, отделы главного конструктора, главного технолога и главного сварщика на заводе-строителе разрабатывают документацию, необходимую для изготовления технологической оснастки, распределения работы между цехами завода и ее организации в цехах с указанием трудоемкости всех работ и применением при этом оборудования. В технологических условиях, как уже упоминалось раньше, содержится сведения об оборудовании и конструкциях судна, строительно-монтажных контроллерах (порядок испытаний, обслуживания, ресурс работы, перечень запасных частей и т. п.).

Спецификация содержит описание судна в целом и отдельных его конструкций. Спецификация дает четкое представление о назначении

и возможности сооружения судна, что позволяет избежать ошибок на заводе-строителе и облегчает работу судна заказчику.

Сдаточная документация обеспечивает возможность организации и проведения заводских и судовых испытаний, передачи экипажу судна всего необходимого снабжения. В нее входят программы испытаний устройств и систем, инструкции по их обслуживанию, ведомости снабжения и запасных частей.

Назначение эксплуатационной документации — обеспечение нормативной эксплуатации судна в соответствии с договорной спецификацией. Она комплектуется отцом главного конструктора завода и передается на судно. Туда входят необходимые для обучения экипажа инструкции по обслуживанию всех устройств, систем и приборов, установленных на судне, а также инструкции по погрузке, по остойчивости, ведомости запасных частей со всеми изменениями, внесенными в них в процессе постройки и испытаний судна.

1.5.7. Организация проектирования

Судно — сооружаемая весьма дорогие и строящиеся малыми сериями. Невозможно спроектировать и построить опытный образец судна, как это делается во многих отраслях промышленности, с последующей оценкой и устранением обнаруженных дефектов. Поэтому построения судна начинается после выпуска рабочей документации. Это требует такой организации процесса проектирования, при которой исключалась бы возможность появления крупных ошибок.

Предполагая рациональной организации процесса проектирования судов были сформулированы академиком В. Л. Позднимым еще в 30-х гг.

Она сводится к следующему:

обязательное проведение комплексного анализа тех экономической и технических условий, в которых проектируемое судно должно строиться и эксплуатироваться;

решение проектной задачи одновременно в нескольких вариантах; отбор лучших вариантов в различных стадиях проектирования на специальных совещаниях с участием крупных специалистов судостроительной промышленности, заказчика и заинтересованных организаций;

назначены главным конструктором инженеры исключительно высокой квалификации, обладающих знаниями во всех областях судостроения.

Проектом эти условия осуществляются следующим образом. Техническое задание, разработанное ведомством заказчика, выдается проектной организацией, которая специализируется на проектировании судов определенного типа и принимает заказ на их проектирование от всех организаций СССР.

В СССР проектированием судов занимается центральные конструкторские бюро (ЦКБ), и центральные проектно-конструкторские бюро (ЦПКБ), в системе Министерства рыбного хозяйства СССР — госу-

дарственные проектные институты рыбопромышленного флота (Дирпроепробфлот).

ЦКБ подразделяется на специализированные отделы, среди которых наиболее важными являются:

- корпусный отдел;
- отдел судовых устройств;
- отдел механического оборудования;
- отдел электрооборудования;
- технологический отдел.

Внутри отделов также осуществляется специализация. Они разделяются на секторы, а секторы на группы, каждая из которых занимается разработкой определенных конструкций судна. В небольших КБ разделение на группы может не быть.

После приема заказа на разработку проекта ему назначается номер и назначается главный конструктор. Идеи главного конструктора — специалист, знания и опыт которого потенциально позволяют ему в объеме задания проекта спроектировать судно самому, а организаторские способности которого позволяют организовать наиболее экономичную работу коллектива конструкторов для выполнения всех заданий проекта в минимально возможный срок. Это должен быть инженер, способный выполнить приближенный расчет всех характеристик судна и заместить удовлетворительным решением всех возникающих частных вопросов, предоставляя сотрудникам возможность дать хорошие и оптимальные частные решения.

В результате бурного технического прогресса нашего века и накопления огромного объема знаний постоянно растет естественная тенденция к более узкой специализации технических профессий. Один инженер уже не может быть вдумчивым компетентным во всех областях даже своей профессии. Это дало повод Т. Джеммеру заявить, что в настоящее время существует весьма ограниченное число корабельных инженеров, достаточно компетентных, чтобы осуществлять руководство проектированием корабля в целом, и это число неуклонно сокращается [16].

Естественно, что один главный конструктор не может выполнять весь объем работы по руководству проектом. Поэтому в помощь ему из наиболее опытных специалистов создается группа главного конструктора, работающая с ним от проработки технического задания до сдачи судна. В зависимости от сложности судна эта группа может состоять из пяти—семи человек или составлять сектор или отдел главного конструктора. Группа главного конструктора осуществляет координацию работы отделов, проверку согласованности технических решений отделов между собой и с общей идеей, заложенной в судно.

Разработка проекта проводится под наблюдением представителей заказчика и Регистра СССР. Представители заказчика выставляют частные требования к отдельным конструкциям судна и согласовывают возникающие в ходе проектирования вопросы и недоразумения. Представители Регистра следят за тем, чтобы судно отвечало всем требованиям и правилам Регистра СССР. В ходе проектирования периодически наблюдение со стороны Регистра может отсутствовать, однако готовый проект обязательно представляется на рассмотрение и утверждение Регистра.

На каждом заключительном этапе проект подвергается согласованию и экспертизе, которые предшествуют его утверждению. Проектные материалы согласовываются кроме Регистра СССР с организациями, указанными в техническом задании. Обычно экспертизу осуществляют научно-исследовательские институты (ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова и ЦНИИ морского флота). После экспертизы проекты рассматриваются заказчиком в присутствии представителей проектной организации, организации, проводившей экспертизу, и завода-строителя на научно-технических советах. Присутствие представителей перечисленных организаций необходимо для того, чтобы в случае разногласий прийти к согласованному решению без излишней перепроцедуры.

В случае серьезных разногласий проект возвращается в ЦКБ на доработку. После утверждения заказчиком технического проекта проектант с участием завода-строителя составляет договорную спецификацию по всему судну.

Затем проектная организация приступает к выполнению рабочей документации, которая согласовывается в рабочем порядке только с представителями завода-строителя и заказчика.

Проектирование судна — дорогостоящий и длительный процесс.

Примерные сроки, мес. проектирования судна среднего водоизмещения, мес:

Эскизный проект	4
Экспертиза	1
Технический проект	6
Экспертиза	2
Рабочий проект	12
Итого	25

Таким образом, сроки проектирования судна сопоставимы со сроками их постройки. В значительной мере это связано с пороками сложившегося порядка проектирования. Во-первых, выполнение проектной в ЦКБ, оторванных от верфи, ведет к удорожанию согласований и доработок и порождает обширную излишнюю переписку между ними. Во-вторых, некоторые материалы разрабатывались три раза (в эскизном, техническом и рабочем проектах), тогда как можно было бы разработать их один раз в техническом или рабочем проектах в объеме, достаточном для согласования с Регистром. В-третьих, в рабочем проекте выполнялся примерно большое число чертежей (около 12 000, если привести их к формату 24). Средняя трудоемкость разработки одного чертежа 95 ч. В зарубежном судостроении существует аналогичное положение. По данным японских специалистов для постройки танкера дедвейтом 200 000 т требуется 21 300 чертежей, из них — 12 900 для судна и 8400 для оснастки [58].

Обеспечить изготовление такого количества изыскательской документации в короткие сроки и с хорошим качеством возможно только при автоматизации проектирования. На современном этапе научно-технического прогресса дальнейшим направлением развития является компь-

лекция автоматизация проектно-конструкторских работ, охватывающая все основные этапы проектирования и технологической подготовки производства объектов новой техники.

1.5.8. Принцип работы в системе автоматизированного проектирования

САПР является новым инструментом в руках проектианта, необычайно расширяющим его возможности проектировать и собирать технические решения. Новое техническое средство в свою очередь создает условия для новой технологии проектирования. Теперь исключается возможность до конца выполнить в разработке проекта судна традиционные примененные в металле варианты или принятию системного проектирования. В самом деле, уже после получения инженерам рассчитанной судно как сложную систему и при проектировании разделении его на подсистемы. Такому разделению соответствует и структура ЦКБ МСП и технология согласования технических решений по подсистемам судна на всех этапах проектирования. В качестве регулятора процесса проектирования выступает один главный конструктор, он и обеспечивает проектирование подсистем таким образом, чтобы уровень эффективности судна в целом был по возможности наибольшим. Правда, без САПР главный конструктор не в состоянии провести полную оптимизацию проекта из-за необычайно большой трудности самой задачи. Традиционный критерий сравнения служит базовое судно (проект предыдущего поколения или хорошо зарекомендовавший себя в эксплуатации прототип чужого производителя), а для согласования характеристик подсистем используется «метрическая диаграмма». Его существо состоит в том, что в результате решения задачи высшего уровня (выбор элементов судна главным конструктором) формируются для каждой подсистемы ограничения (данные). Они могут выражаться в максимально допустимых габаритах названного отделения, минимально допустимой длине грузовых люков, строго ограниченном диапазоне аппликации центра тяжести судна, а в различных условиях нагрузки, максимально допустимой массе устройства и т. д.

Таким образом, некая j -я характеристика k -й подсистемы может быть только не больше (меньше) заданной величиной: $E_{jk} \geq e$ или $E_{jk} < e$.

Учет таких ограничений и позволяет в определенной мере обеспечить увязку верхнего и нижнего уровней проектирования. Так, при выполнении крайних условий (равенств) для подсистем ранее принятые главным конструктором решения для всего судна не изменяются. Такая жесткость лимитов, однако, снижает инициативу проектировщика подсистем и не обязательно ведет к оптимальному варианту. В реальном проектировании в результате обмена информацией между главным конструктором и специализированными отделениями ограничения «двигаются»: один последний нарушается ограничения по подсистемам для эффективности всего судна, можно перераспределить лимиты между подсистемами. При этом неизбежен элемент субъективизма (разные главные конструкторы не принимают одинакового решения в исходных

ситуациях). И в этом состоит основная неопределенность практического «двухэтажного» подхода к проектированию судна.

Полная реализация принципов системного подхода к проектированию, требующих подчинения проектирования всех подсистем и технических средств единым требованиям оптимизации судна в целом, возможна не только при одновременной оптимизации элементов самого судна и его подсистем в рамках единой задачи.

Механизм такого согласования (см. § 2.6) в виде двойственных оценок, или маркимальных производных, введен в теорию проектирования В. М. Пашаевым в 70-х гг. [34]. Программирование на ЭВМ задачи оптимального проектирования судна позволяет найти эти производные и ввести их в расчет подсистем в качестве заданных величин.

Единство информационной БД по разрабатываемому проекту и независимость программных модулей и данных позволяет разработать различные части проекта в разных коллективах, в разное время. Централизация информации исключает ошибки и несогласованности при обмене информацией между подсистемами, а использование маркимальных производных позволяет оптимизировать всю систему — судно.

1.5.9. Системный подход к проектированию

С позиций системного подхода задача проектирования какого-либо сооружения (объекта) в общем виде может быть сформулирована так: определить некоторое множество элементов X , выбрать из него подмножество $\bar{X} \in X$, разместить \bar{X} в определенном порядке, соединить с помощью L связей таким образом, чтобы в целом они выполнили некоторое множество функций F , обеспечивая достижение некой цели S заданной общей цели Z . При этом оптимизация системы должна удовлетворять комплексу ограничений Q и быть оптимальной (предпочтительной) относительно некоторого критерия W с учетом принятых правил предпочтения P . Таким образом, судно может быть представлено как сложная система в виде $S = f(z, F, X, L, Q, W, P)$.

Общий подход к решению такой задачи базируется на декомпозиции системы с последующим анализом частных решений и их координацией, и здесь возникает три самостоятельные проблемы: формирования подзадачи (выяснения подсистем); выбора принципа координации подзадач и разработки координирующей функции; организации процедуры проектирования.

Относительно первой проблемы можно вполне определенно высказаться в пользу многоуровневого формирования процесса проектирования. Обычно на начальной стадии проектирования обмен информацией весьма ограничен, затем по мере решения задачи на верхнем уровне этот обмен начинает расти и позволяет увеличить глубину исследования на более низком уровне проектирования и т. д. На рис. 7 показаны две наиболее приемлемые схемы декомпозиции системы. По первой схеме на каждом уровне проектирования система разделяется на подсистемы по новому с учетом выполняющихся взаимосвязей на предыдущем уровне исследования. Эта схема предоставляет проектианту возможность достаточно

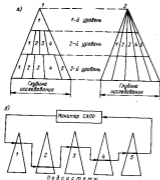


Рис. 7. Два варианта декомпозиции системы: а — структуры индивидуальными (1) и элементами (2) по уровням; б — анализом элементов при единой структуре уровней

быстро разработать и отладить отдельные подсистемы, однако для обеспечения достаточной глубины исследования каждый из них требуется значительное усложнение программного обеспечения и изменение набора технических средств САПР. Большой недостаток схемы 1 состоит в том, что утилизация подсистем при движении через уровни (по вертикали) затрудняется.

Схема 2 лишает указанного недостатка, хотя характеризуется усложнением структуры объекта в целом. Зато при сохранении единой структуры на всех уровнях возможна разработка подсистем одновременно с разной глубиной исследования (рис. 7, б).

Говоря о декомпозиции задачи оптимального проектирования судна, нужно иметь в виду, что она в большой степени уже предопределена структурой судна и практикой проектирования. Сейчас принято [35] деление на внешнюю и внутреннюю задачи проектирования (см. табл. 1).

Внутренняя задача проектирования, охватывающая стадии от технического предложения до технологической подготовки производства, содержит такие остающиеся разработки проекта, которые формируют судно как единую систему и в то же время как элемент системы более высокого порядка (их можно объединить понятием системное проекти-

рование), и такие, которые детализируют проектные решения по основным построениям документации (их можно объединить понятием конструкторское проектирование). Эти две категории составных задач резко отличаются по содержанию. Системное проектирование формирует облик будущего судна, определяет его эффективность и составляет теоретическую часть процесса проектирования. Конструкторское — наиболее трудоемкая и творческая часть процесса проектирования, требующая высокой степени автоматизации графических работ.

В системном проектировании различают верхний и нижний уровни (или верхний и нижний уровни внутренней задачи проектирования). На верхнем уровне определяется элемент судна в предположении о фиксированных свойствах подсистем. На нижнем — определяются элементы подсистем и проводится их оптимизация с одновременным согласованием качества судна как единого целого.

По окончании системного проектирования переходит к конструкторскому проектированию, где выполняются в рабочие чертежи и технологические процессы решения, выполняемые в период системного проектирования.

Вторая проблема декомпозиции — выбор принципа координации задач на разных уровнях проектирования — может быть решена, если отыскать критерий, обладающий тремя свойствами: непротиворечивости, т. е. оптимизация характеристик нижнего уровня не в ущерб «интересам» глобального критерия; согласованности, т. е. способности расширить область поиска наилучшего решения для судна в целом; автономности, т. е. возможности оптимизации характеристик подсистем независимо от других подсистем.

Такими свойствами обладают упомянутые выше марковские оценки. Наконец, третья проблема — организация процедуры координации итераций, решаемой применением известного в технике принципа итераций. Каждая итерация (приближение) заключается в решении задачи верхнего уровня, определении управляющих параметров для задач нижних уровней, решении этих задач, проверке «балансированности» проекта, т. е. выполнении требований к качеству судна, и принятии решения о дальнейшей корректировке элементов судна и его подсистем (см. рис. 1).

Возможны и другие пути декомпозиции задачи оптимального проектирования, но практическая ценность отхода от сложившейся структуры невелика, к тому же еще недостаточно опыта для создания САПР, охватывающей на такую последовательность решения задачи проектирования. В настоящее время делаются попытки разработки ИПП для проектирования определенного класса судов, например ППП «Планучий док» [15] или ИПП «Корабль на подводных крыльях», о котором упоминалось в § 1.3.

На этапе системного проектирования определяется облик будущего судна и принимаются все проектно-технические решения по нему. В этот период для проекта важнейшую роль играют полнота и достоверность данных, используемых и качество предельных расчетов. В соответствии

проекта системного проектирования поэтому главную роль играет автоматизированный банк данных. Полнота и достоверность заложившей в него информации в большой мере влияют на качество проектирования.

Системное проектирование судна можно представить в виде такой последовательности:

- создание банка данных для проектирования судна;
- разделение судна на подсистемы;
- формирование математической модели судна и моделей подсистем;
- оптимизация элементов подсистем и элементов судна;
- машинное документирование результатов проектирования в объеме, необходимом для экспертизы проекта;
- экспертиза, согласование проекта с заинтересованными организациями и утверждение заказчиком.

Позиции 1, 4, 5 осуществляются в САПР; 2, 3, 6 — проектистами в реальном масштабе времени. После внесения изменений в проект по замечаниям заказчика переходит ко второму этапу проектирования судна — конструкторскому проектированию, в основу которого кладутся результаты, заложенные в банк данных (на НМД) после проектирования на системном этапе и скорректированные по последним замечаниям.

Основной объем работ конструкторского проектирования должен выполняться САПР.

При решении инженерных задач приходится иметь дело в основном с двумя разновидностями расчетов — проверочными и проекционными. Проверочные расчеты уже сформулированы в основном на одной из кораблестроительных дисциплин (прочность, теория корабля и т. п.); задачи проверочного расчета имеют однозначное решение. Проектные расчеты всегда многозначны, для их выполнения требуется привлечение группы специальных дисциплин.

Поясним это простым примером. Пусть требуется определить необходимые размеры прямоугольного основного бруса длиной l , нагруженного поперечной проекцией проектной сосредоточенной силой P . Высота сечения в три раза больше ширины. Балка свободно опирается на концы, один из которых подвижен в продольном направлении. Это простая задача проверочного типа. Здесь все известно: действующая нагрузка, марка материала и, следовательно, допустимые напряжения при изгибе $[\sigma]$, длина балки, условия на опорах. Искомой (главной неизвестной) в задаче является ширина балки b . Из формулы изгибного напряжения, которое принимается равным $[\sigma]$, получим следующее решение:

$$b = \sqrt[3]{\frac{Pl}{6[\sigma]}}$$

Если в эту задачу внести требование необходимой прочности при минимальной массе, то задача приобретает проектный характер и усложняется: вначале определяется отношение B и b , обеспечивающее минимальный момент сопротивления бруса (из курса сопротивления материалов, читатель, по-видимому, помнит, что это отношение состоит 7:5), а затем решается предыдущая задача. Наконец, если требуется спроектировать балку, способную в пролете l выдерживать сосредоточенную нагрузку P , то задача превращается в чисто проекционную. Обычно при этом выдвигается еще требование минимальной стоимости конструкции. Неизвестных в задаче становится больше (теперь это: высота и ширина сечения; марка материала конструкции — дерево, сталь, алюминий, титан, пластик, бетон; вид конструкции — брус, шпр, труба, коробчатая конструкция, ступенчатая конструкция и несколько модификаций, последние конструкции), и можно получить не менее 36 различных решений, каждое из которых можно довести до расчета стоимости изготовления. Ясно, что эта задача намного сложнее и более трудоемкая, чем первоначальная задача проверки.

Описанную проектную задачу, можно завершать тремя способами. Во-первых, решить всего один из вариантов, убедиться, что балка

выдерживает нагрузку и предложить это решение заказчику в качестве оптимального. Это будет, так называемое, допустимое решение. При этом нельзя сказать, насколько оно лучше (в смысле стоимости) других возможных вариантов. Во-вторых, можно решить два (или больше) вариантов и выбрать тот, который дешевле. Теперь заказчику можно предложить улучшенное решение. В-третьих, можно перебрать все возможные варианты и предложить наиболее дешевый. Такой вариант будет наилучшим — оптимальным.

В рассмотренном примере отчетливо выступают важнейшие компоненты оптимального проектирования — главные неизвестные (размеры объекта, материал и вид конструкции), ограничения (масса конструкции), и критерий оптимизации (минимальная стоимость). При оптимизации характерен большой объем работ; с увеличением числа главных неизвестных, или, как говорят, размерности задачи, объем работы становится непосильным для ручного счета. Поэтому оптимальное проектирование органически связано с автоматизацией. Во всех областях техники теперь possible термин автоматизированное проектирование. Впервые оно было реализовано в нашей стране в широком масштабе в 1957 г. при проектировании серии электростанций двигателями.

Оптимизировать решение в автоматизированной системе проектирования возможно только при наличии математической модели объекта, которая представляет собой систему математических выражений, описывающих свойства объекта во взаимосвязи с его основными элементами и характеристиками.

§ 2.1. Классификация величин, используемых в математическом моделировании

Все величины, участвующие в задаче проектирования судна, можно разделить на четыре типа: неизвестные, задания, нормативы и параметры.

Неизвестные — величины, которые рассматриваются в процессе решения задачи. Причем, есть независимые друг от друга неизвестные (длина судна, ширина, высота борта, осадка, три из пяти коэффициентов полноты судна). Их называют главными неизвестными или простыми переменными*. Возможны и другие комбинации главных неизвестных; далее мы будем, например, в качестве таковых рассматривать длину, удельные корпусы, отношение ширины к осадке, отношение высоты борта к осадке, коэффициенты продольной полноты, полноты водозащита, полноты главной ватерлинии. И есть неизвестные весьма важные для проекта, но зависящие от главных неизвестных и выражаемые через них (также как водозащитность, мощность главного двигателя и т. д.). Такие неизвестные академик В. Л. Подданин называл обобщенными неизвестными. Количество

главных неизвестных определяет размерность задачи**. Соответственно различают задачи одномерной оптимизации (для одного главного неизвестного) и многомерной оптимизации (двух-, трех-, *n*-мерной). Разумеется, в зависимости от поставленной задачи и качества главных неизвестных могут выступать те или иные элементы и характеристики судна.

Заданные — величины, указанные в задании в явном или неявном виде (например, грузоподъемность и удельная нагрузка кубатуре груза, а следовательно, и грузоплотность судна). В зависимости от типа задачи проектирования — внутренней или внешней (см. табл. 1) — одни и те же величины могут оказаться либо главными неизвестными, либо заданными. Во внешней задаче проектирования, например, грузоподъемность и скорость являются тремя неизвестными, а во внутренней — среди заданных величин.

Параметрами являются величины, косвенно обусловленные заданием какого-либо характеристике судна или многозначными правилами и конвенциями на постройку и эксплуатацию судна. Например, эксплуатационный период судна определяется нормативами в зависимости от типа судна и его длины, указание ледового класса судна в задании на проектирование автоматически обуславливает определенный процент увеличения массы металлического корпуса проекта, указание мощности энергетической установки и ее типа определяет удельные расходы топлива и измеритель массы энергоустановки и т. д. Требования правил и конвенций выражаются через определенные нормы (допустимые напряжения в сварках корпуса, размеры сальников в типовых перекрытках, нормы площади помпальных, нормы непотопляемости, остойчивости и многое другое). Изменение норм равносильно изменению постоянных коэффициентов при неизвестных в системе уравнений, оно обязательно приводит к изменению результата задачи.

Параметрами в явном математическом смысле являются часть переменных в уравнении со многими неизвестными, которые временно принимают постоянные значения. Параметрический анализ широко распространен в технике. В теории проектирования, в частности, на его основе построено большинство расчетов сопротивления воды (графики Павлова, Тейлора, Штурмфа и др.), явные зависимости коэффициентов сопротивления от коэффициентов формы корпуса, так, например, параметром является число Фруда и т. д. В проектной задаче параметрами могут служить различные величины: тип энергоустановки, сорт топлива, положение машинного отделения по длине судна, грузоплотность, скорость и т. д. Ясно по аналогии с нормативами, что изменение параметров вызывает изменение результата решения.

Наконец, в задачах оптимального проектирования обязательно наличие еще одной величины — критерия оптимальности.

Проектирование любого сооружения относится к проблеме, характерной для всей практической деятельности — использованием имеющихся ресурсов для достижения по возможности большей выгоды

*Во многих источниках используются термин „простые параметры“ [36, 36], который здесь не применяется во избежание смешения с параметрами проектной задачи.

**Число [34] для размерности означает произведение числа переменных на число ограничений задачи.

(по П. Я. Чебанову). Именно достижение наилучшего результата при задане определенных ресурсов, а не „наилучшего результата при максимальных ресурсах“, как иногда неверно трактуется задача получения наилучшего результата.

Задача проектирования относится к общему классу задач на „принятие решений“. В самом деле, каждый раз проектируя что-то, мы должны решить, как распорядиться имеющимися средствами для получения наилучшего результата.

Принимая любое проектное решение, мы преследуем определенную цель. Степень достижения поставленной цели отождествляется с максимальной (максимизирующей) векторной функцией, заданной на множестве исходов всех решений и принимающей действительные значения. Эта функция называется целевой функцией. Значения этой функции на каждом исходе служат критерием сравнения, или критерием оптимальности. Примером целевой функции, часто встречающимся в инженерной практике, является стоимость, вес, прочность, габариты, КПД. Выбор критерия оптимальности зависит от характера поставленной цели. Основной закон деятельности человека — достижение желаемого результата при наименьших затратах ресурсов. В подавляющем большинстве случаев эти затраты можно представить в денежном выражении, т. е. работать с экономическим критерием; а в исключительной мере роль играет соотношение между полезным эффектом и затратами на его получение [5, 30, 46]. Это соотношение называется эффективностью и служит целевой функцией при проектировании.

Например, целью проектирования транспортного судна для собственных нужд страны является выполнение определенного объема перевозок народнохозяйственных грузов. Тогда естественно стремиться к минимуму затрат на выполнение этих перевозок. В тех случаях, когда объем перевозок не регламентирован, целесообразно стремиться минимизировать затраты на перевозку 1 т груза. В любом случае необходима оценка экономической эффективности судна, и мы к ней вернемся в § 2.4.

§ 2.2. Математическая модель судна

Обычной во всех технических науках путь определения неизвестных величин — составление и решение уравнений, связывающих эти величины с заданными. Связь между величинами может иметь физическую природу (объективные физические законы и закономерности, подобно закону Архимеда или балансу масс сооружений) или логическую основу (например, ограничения основанные на соотношениях координатного, экономического или эстетического характера). Соответственно, часть указанных взаимосвязей может быть выражена уравнениями, другая — неравенствами. Если в неравенствах учитывать только граничные условия (отбрасывая тем самым многие решения, которые удовлетворяли бы неравенству), можно получить систему уравнений

$$F_j(x_1, \dots, x_n, a_1, \dots, a_m, b_1, \dots, b_k, c_1, \dots, c_j) = 0, \quad (2.1)$$

где i — порядковый номер уравнения; x — главные неизвестные (неизвестные переменные, оптимизируемые переменные, проектные переменные); a — заданные величины; b — нормативы; c — параметры.

Рассмотрим некоторую проекционную систему, описываемую m уравнениями с n неизвестными, можно выделить три типа задач. Если $m = n$, задачу называют алгебраической. Она имеет одно решение. Для систем линейных уравнений решение всегда однозначно, для нелинейных легко выделить единственное решение, рассматривая с формальной и технической точек зрения значение кодового корня). Если $m > n$, то задача не определена и, как правило, не имеет решения. Часто ее можно привести к алгебраической, отбрасывая часть уравнений, отражающих наименее существенные черты объекта или взаимосвязи его свойств с главными элементами. Наконец, при $m < n$ задача всегда не определена и имеет бесконечно много решений.

В практике проектирования чаще всего приходится иметь дело с задачами последнего типа. В таком случае часть главных неизвестных переводит в параметры (привязывая им определенные значения) и получает соответствующее число групп решений. И здесь уже возникает вопрос о выборе лучшего решения. Такой выбор может быть сделан при наличии критерия сравнения.

Если бы была задача при сохранении системы неравенств решается не алгебраическими методами математического программирования. Если система (2.1) связывает свойства и характеристики судна с его элементами, то она служит математической моделью данного судна (ММС). Тогда она должна содержать взаимосвязи для выполнения технических и экономических расчетов, т. е. цель расчетов, которую можно составить из отдельных блоков: технического, экономического, блока исходных данных. Пример структурой схемы математической модели приведен на рис. 8 (ММС является фрагментом математической модели проектирования). Для определенного набора независимых переменных ММС дает однозначные значения значений ограниченной и целевой функций, которые затем используются в блоке оптимизации. В техническом блоке ММС применяются апробированные для данного типа судна методы и методы прикладных кораблестроительных дисциплин (теория корабля, конструкция корпуса, строительная механика корабля и т. д.) и зависимости теории проектирования судов. В перечне ограничений формулируют требования и правила, существующие для данного типа судна, и любые другие ограничения, интересующие заказчика.

Математические модели судов по аналогии с используемыми в них алгоритмами расчетов [21] можно классифицировать по детальности и укрупненности, а также характеризовать полнотой и упорядоченностью.

Детальные математические модели содержат совокупности подробных расчетов и графических работ, представляют число приближений, необходимое для определения отдельных элементов и характеристик проектируемого судна. Укрупненные модели включают только укрупненные расчетно-графические блоки и небольшое число приближений для оценки свойств судна. Детальные и укрупненные модели соответственно охватывают микро- и макроподходы. Моделирование на количественном уровне с

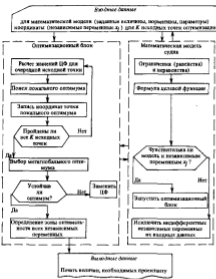


Рис. 8. Структура схемы математической модели проектирования сооружений

использованием микромоделей называется адекватным моделированием, а с применением микромоделей — детальным моделированием.

Плюсы модели характеризуются глубиной и всесторонностью рассмотрением и учетом совокупности требований, предъявляемых к проектируемому судну. Модели, в которых описаны все совокупности расчетов и построений, связанных с определением основных элементов, — полные, а те, в которых отсутствуют проработки отдельных вопросов проектирования, — сокращенные.

Наконец, упорядоченность моделей характеризуется логикой выбора последовательности и точности отдельных расчетов и построений. Известно, например, что точность одноименных расчетов (нагрузки, мощности, стресса и др.) должна зависеть от номера приближения, так как с каждым последующим приближением растет точность исходных предположений. Последовательность проводимых расчетов должна минимизировать их трудоемкость при сохранении точности.

Конструирование математической модели, преследует основную методологическую цель проектирования — уменьшение числа итераций. Любая цель объясняется тем, что какое-то частное результаты или задачи оказываются не удовлетворены, а они зависят от конечной цели.

Принцип упорядоченности моделей действует в каждом случае противоречия с требованием автоматизированного проектирования о единстве математической модели на всех этапах проектирования. Однако наличие автоматизируемого банка данных и модульной системы построения математических моделей позволяет сочетать требования упорядоченности и единства моделей за счет введения дополнительных элементов модели на каждом последующем этапе.

Для анализа и обобщения результатов удобно иметь в модели безразмерные соотношения. С этой точки зрения расчетам ограничений в безразмерном виде отдается предпочтение при работе с адекватными моделями. С другой стороны, использование в модели абсолютных значений главных элементов дает информацию в виде, более приемлемом для заказчика, но зато требует значительной детализации модели. Например, проверка вместимости в безразмерном виде не требует разработки теоретического чертежа, а для размерного она обязательна. Примеры формирования ограничений для типовых моделей судов приведены в монографии [35]. Ниже рассмотрена одна из укрупненных адекватных моделей судна.

5.2.3. Оценка вместимости, неадекватности устойчивости и плаваемости в математической модели судна

К судну предъявляется много требований. Все они могут быть объединены в две группы: 1) ограничения, непосредственно накладываемые на главные элементы по условиям эксплуатации, постройки и другим соображениям. (Например, по условиям постройки на верфи длина судна не должна превышать 30 м; для прохода в канале осадка не должна выходить за 11,5 м и т. д.) Это так называемые традиционные ограничения; 2) требования, предъявляемые к качеству* судна. Они в конечном счете сводятся к ограничению главных элементов не непосредственно, а через соотношения, связывающие свойства судна с его главными элементами и подлежащими функциональными ограничениями.

Основные свойства, которые учитываются при проектировании судна, таковы: грузоподъемность, общая вместимость по объемам и площадям, значительная остойчивость, остойчивость на больших углах крена, аварийная

*Качество — степень обладания определенным свойством.

стойкость, грузоподъемность, баланс масс судна, мореходность (плавание качки, отсутствие заливаемости и осевания), ходкость, непотопляемость, экономичность, прочность и т. д.

На первом уровне внутренней задачи проектирования считают, что часть указанных свойств автоматически обеспечивается за счет последующей оптимизации в задаче нижнего уровня (например, обеспечение прочности, устойчивости на больших уклонах крена и т. д.). Тогда требования к этим свойствам не включаются в задачу верхнего уровня.

В укрупненной модели, используемой для первичной оценки свойств проектируемого судна, бывает достаточно четырех ограничений: вместимости, непотопляемости, начальной устойчивости и баланса масс.

2.3.1. Вместимость судна

Объем грузовых помещений не может быть меньше объема чистого груза с учетом необходимых зазоров. Переходя к теоретическому объему * основного корпуса W_0 и учитывая степень его утилизации под грузовые помещения η_w , увеличение подпалубной вместимости k_n за счет комбинеса люков и, наоборот, ее уменьшения k_n из-за потерь на набор, внутренние конструкции в грузовых помещениях и технологические зазоры, можно записать

$$W_n \geq \frac{P_g \mu_r k_r}{k_n k_w \eta_w}, \quad (2.2)$$

где P_g — масса чистого груза (грузоподъемность); μ_r — удельная поргужная кубатура груза; k_r — доля груза, размещаемого под верхней палубой судна. Очевидно соотношение

$$\frac{W_n}{D} = \frac{\delta_w}{\delta k_n \eta_w} \frac{M}{T}, \quad (2.3)$$

где W_n — объем основного корпуса по верхней палубе; D — водоизмещение судна в грузу; M , T — массы борта и осадки; δ_w , δ — коэффициенты общей полноты основного корпуса и полноты водоизмещения между переборками; ρ — плотность морской воды $\rho = 1,025 \text{ т/м}^3$; k_n — коэффициент подпалубных выступающих частей (в том числе и переборки люков).

Имея в виду, что $D = P_g / \eta_w$, а коэффициент полноты основного корпуса выражается через коэффициент развала бортов k_n^{**} и коэффициент полноты ГВЛ δ :

$$\delta_w = \delta T / H + \delta k_n (1 - T/H), \quad (2.4)$$

из (2.3) получим

* Определяется по теоретическому чертежу.

** См. формулу (2.9).

$$(H/T)_{\text{нмс}} > 1 + \delta \delta k_n \left(1,035 \frac{\mu_r \eta_w}{k_w} \frac{k_r}{k_n k_n} - 1 \right), \quad (2.5)$$

где $k_n \eta_w = 1,035$ в предположении, что водоизмещение выступающих частей составляет около 1% водоизмещения судна.

Для определения величины в правой части формулы (2.5) используются аппроксимации данных по построенным судам:

$$\eta_w = \eta_0 + 0,07 \ln \left(\frac{P_g}{1000} + 0,24 \right) + \Delta \eta_r; \quad (2.6)$$

$$\eta_0 = \begin{cases} 0,26 & \text{— для какатных судов („ро-ро“);} \\ 0,36 & \text{— универсальных сухогрузных судов;} \\ 0,44 & \text{— нефтеналивочных;} \\ 0,46 & \text{— нефтерудозов;} \end{cases}$$

$$\Delta \eta_r = \sigma_{37} \left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^3 \right] + \sigma_w \left[1 - \frac{L}{L_0} \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right],$$

здесь доля энергоустановки σ_{37} и зазоров попутки σ_w в водоизмещении судна определяются по средним значениям табл. 6 [1];

$L_0 = 12000$ миль;

$$r_0 = \begin{cases} 16 \text{ уз} & \text{— для танкеров и шаллочников;} \\ 18 \text{ " } & \text{— сухогрузных судов;} \\ 22 \text{ " } & \text{— какатных судов и контейнеровозов;} \end{cases}$$

коэффициент утилизации теоретического объема основного корпуса

$$\eta_w = \frac{\sigma_w}{\sqrt{\delta (0,4 + P_g^{0,15} \mu_r^{0,15})}}. \quad (2.7)$$

где

$$\sigma_w = \begin{cases} 0,26 & \text{— для какатных судов;} \\ 0,27 & \text{— контейнеровозов;} \\ 0,30 & \text{— универсальных сухогрузных судов;} \\ 0,35 & \text{— танкеров и шаллочников;} \end{cases}$$

доля подпалубного груза k_n зависит в зависимости от архитектурно-го типа проектируемого судна;

коэффициент увеличения вместимости трюмов за счет комбинеса люков

$$k_n = 1 + \frac{0,5666}{\frac{P_g}{1000} + 2,43}; \quad (2.8)$$

использование теоретического объема грузовых помещений выражается коэффициентом

$$k_n = \begin{cases} 0,92 & \text{— танкеры без люков и переборок;} \\ 0,88 & \text{— " с люками и переборками;} \\ 0,96 & \text{— сухогрузные суда с шаллочным грузом и чистые шаллочки;} \end{cases}$$

Таблица 6. Характерный состав нагрузки (составленная везе) для моторных

Наименование судна	Валовой вес				
	Картон	ЖУ	Судовые системы	Электрооборудование	Вещные + склад и инвентарь
Пассажирское (океанское)	48,3	8,8	2,5	2,4	0,01
Судовозное общепита (теплот)	22,5-24,5	3,0-7,0	0,7-1,7	0,6-3,0	0,00
Лыжное	26,5-28,0	2,9-3,8	0,8-0,9	1,3-1,5	0,01
Котельно-моторное	30,1	4,3	1,1	1,2	0,00
Наличие (для перевозки миссовых грузов)	17,8-26,3	1,9-4,1	0,5-0,7	0,3	0,01
Нефтезапасное	13,6-25,0	0,9-4,0	0,7-2,0	0,1-0,4	0,04
Промышленное (автомобильное)	44,0-59,0	4,7-11,1	1,8-2,5	1,2-2,1	0,00
Промышленное (использование)	40,3	4,7	4,3	3,8	0,01
Рыболовецкое	38,8	5,3	5,0	1,7	0,01
Букар	46,0-63,0	10,9-24,7	1,6-3,8	1,1-3,3	0,01
Наличие (до-ра*)	40-42	2,5-5,0	1-2	1,5-2,0	0,00

развал бортов в надводной части судна характеризуется отношением площади средней надводной ватерлинии к площади ГВЛ и обозначается $K_{\text{в}}$. Исходя из формулы В.В. Азиза для приближенной оценки относительной высоты борта $H/T = 1,07 \rho_{\text{в}} \rho_{\text{л}} + 0,16$ и выражение В. Л. Позинера для параболы срезной по ватерлинии $S_{\text{в}} = S_{\text{ГВЛ}} \left(\frac{T_{\text{в}}}{T_{\text{ГВЛ}}} \right)^{0,6} - 1$

можно получить [12]

$$K_{\text{в}} = 0,5 \left[1 + (1,07 \rho_{\text{в}} \rho_{\text{л}} + 0,16)^{0,98} \sqrt{T} - 1 \right]; \quad (2,9)$$

коэффициент плотности использования определяется логистической зависимостью от относительной скорости

$$\delta = 1 - \frac{0,50}{1 + 100 \exp \{ -22 \text{Fr} \}}; \quad (2,10)$$

где $\text{Fr} = 0,164 v_{\text{в}} / \sqrt{L}$, а свою очередь $v_{\text{в}}$ — эксплуатационная скорость; L — длина между перпендикулярами. (Если δ включается в список независимых переменных, формулой (2,10) не пользуются. Длина судна L почти всегда является независимой переменной, но ее значение из условий удовлетворительной включается на волну (отсутствии сдвига и затопленности) должна отвечать соотношению

Новые суда различного назначения

Грузы, % от D	Коэффициент использования водоизмещения				
	Железные грузы	Железо-концентраты	Специфические и прочие	Топливо, газификация, вода, смазочные масла	
3,3	2,1	0,5	10	0,23	0,33
0,2-1,0	0,3-1,8	0,1-3,1	2,4-13,0	0,45-0,61	0,5-0,73
0,7-0,9	0,9-1,4	0,2-0,9	0,6-0,8	0,57-0,60	0,65-0,68
0,8	0,5	0,4	8,4	0,55	0,62
0,2-0,3	0,4-1,2	0,1-0,9	7,0-10,0	0,60-0,69	0,67-0,79
0,4-0,7	0,2-1,0	0,4-1,2	4,0-9,0	0,56-0,60	0,60-0,64
0,6-1,1	1,7-2,9	5,0-10,0	6,0-16,0	0,15-0,20	0,20-0,35
0,6	1,4		29,3	0,01	0,36
1,3	1,0	4,1	13,9	0,29	0,47
0,9-2,2	1,6-4,0	2,1-6,7	9,0-26,3	0,00	0,11-0,30
0,5	0,5-1,0	1-1,2	12-18	0,33-0,37	0,5-0,51

$$L > \left(5 + 2 \sqrt{\frac{P_{\text{в}}}{\rho_{\text{л}}}} \right) \sqrt{v_{\text{в}}}; \quad (2,11)$$

полученному по данным Л. М. Погуды и Л. Яценко для морских кораблей. Если это ограничение не используется, то необходимо в математическую модель внести расчет сдвига и затопленности с использованием соответствующих справочных зависимостей;

коэффициент плотности грузовой ватерлинии определяется формулой Яценко

$$\alpha = \begin{cases} \left[1 - \frac{0,41}{1 + 100 \exp \{ -25 \text{Fr} \}} \right]^{0,5} & \text{при } 0 < \text{Fr} < 0,35; \\ \left[\frac{0,529 + 0,192 \text{Fr}}{0,723} \right]^{2/3} & 0,35 < \text{Fr} < 0,50; \\ 0,723 & 0,50 < \text{Fr} < 1,0 \end{cases} \quad (2,12)$$

где

$$\alpha = \begin{cases} 1,06 - \text{при V-образных шпангоутах;} \\ 1,04 - \text{" UV-образных (промежуточных) шпангоутах;} \\ 1,01 - \text{" U-образных шпангоутах.} \end{cases}$$

В алгоритме оптимизации для каждого набора независимых переменных правая часть отношения (2.5) вычисляется и сравнивается с отношением H/T . Если H/T не включено в список независимых переменных, то правая часть (2.5) используется в расчетах для исключения H или T .

2.3.2. Условие непотопляемости

Рассмотрим условие непотопляемости судна с наибольшим отсеком в средней части длины судна, симметричным относительно диаметральной плоскости. Отсек такого типа может встретиться у накатного судна, сухогрузного судна с большим длинномерным трюмом, у малого сухогрузного судна со съезжающими на борт грузowymi устройствами.

Регистр СССР регламентирует запас плавучести через величину надводного борта. Если ориентироваться на суда с коэффициентом полноты водоизмещения около 0,68, который применяется в Правилах в качестве стандартного, то известно установить [1, 3], что для гладкоконечного сухогрузного судна нормируемый запас плавучести колеблется при разном давлении от 27 до 37% (рис. 9). Исходя из эти цифры, можно определить относительную высоту борта H/T для проектируемого судна, удовлетворяющего требованиям Регистра по запасу плавучести.

С помощью графика на рис. 9 определяем относительный запас плавучести χ , а затем надводный непотопляемый объем судна $V_{np} = \chi S L B T$. С другой стороны этот же объем через высоту надводного борта и площадь средней ватерлинии в надводной части можно выразить как $V_{np} = k_{np} L B (H - T)$, откуда для гладкоконечного судна имеем

$$\frac{H}{T} = 1 + \frac{\chi S}{\alpha k_{np}} \quad (2.13)$$

Проект с таким отношением высоты борта к осадке будет удовлетворять Правилам Регистра СССР о грузовой марке.

Для расчета переборки необходимо знать длину допустимого отсека при известных H/T , коэффициентах полноты судна δ , α и β и коэффициенте проходимости отсека μ_r .

Обозначим длину затопления l_2 . Тогда, зная длину затопляемого отсека (рис. 10) с переборным сечением, разным редуцированной площади мидель-шпангоута $k_{sp} B T$, найдем объем затопления в виде $V_2 = l_2 \mu_r \varphi \times \chi B T k_{sp}$.

Потеря этого объема компенсируется водоналивом V_1 в воду

надводными объемами за пределами затопляемого отсека. Назовем их эффективным запасом плавучести V_1 . Формула для него может быть получена через выражение для действующей площади средней ватерлинии над затопленным отсеком. Борт в районе отсека можно считать вертикальным, а ватерлинию ватерлинии α аппроксимировать прямолинейным, вводя редуцированные шарниры $Bk_2 = S_{sp} - k_{sp} L B - k_2 l_2 B$. Тогда эффективный запас плавучести $V_1 = L B (\alpha k_2 - l_2 k_2) (H - T)$, где l_2 — относительная длина (в долях L) затопления. Запас V_1 не должен быть меньше объема затопления V_2 , тогда $l_2 B T k_{sp} \mu_r \varphi < B T (\alpha k_2 - l_2 k_2) (H/T - 1)$. Отсюда получаем относительную высоту борта, обеспечивающую непотопляемость при затоплении водой отсека протяженностью l_2 ,

$$\left(\frac{H}{T}\right)_{\text{н.т.п.}} = 1 + \frac{\beta k_{sp} \mu_r \varphi}{\alpha k_2 - l_2 k_2} \quad (2.14)$$

Коэффициенты k_{sp} и k_2 близки к 1 и могут определяться по формуле $k_2 = 2 - \exp\{0,31 l_2^2 [1 - \epsilon \frac{l_2}{L}]\}$ — где $\epsilon = \varphi$ — при вычислении k_{sp} и $\epsilon = \alpha$ при вычислении k_2 . Коэффициент проходимости затопляемого отсека

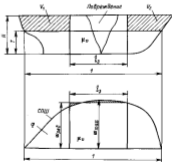


Рис. 10. К определению эффективного запаса плавучести.

СПИ — стрелка по шпангоуту; φ — коэффициент аркадной полноты; V_1 , V_2 — эффективный запас плавучести

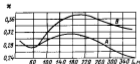


Рис. 9. Относительный запас плавучести гладкоконечного судна по Регистру СССР, включая минимальный надводный борт в стандартную осадность.

A — катаные, B — сухогрузные суда

определяется Правилами Регистра в зависимости от типа помещения. Для грузовых отсеков сухогрузных судов принимают $\mu_p = 0,6$. Коэффициент полноты мидель-планшота для всех типов судов определяется по формуле

$$\beta = 1 - 3,5 \left(1 - \frac{\delta}{a}\right)^{2,4} \quad (2.15)$$

С помощью формул (3.10) и (3.12) можно получить выражение для допустимой относительной длины затопления гидконаливного судна с заданным запасом плавучести и известными параметрами формы ψ и α :

$$\hat{l}_{\text{зат}} = \frac{\alpha k_B (H/T - 1)}{\beta k_{\text{ср}} \mu_p + k_B (H/T - 1)} \quad (2.16)$$

Наконец, если H/T принято из условия вместимости, то длина предельного отсека составляет

$$\hat{l}_{\text{max}} = \frac{\alpha k_B (H/T - 1)}{\beta k_{\text{ср}} \mu_p + k_B (H/T - 1)} \quad (2.17)$$

В частности, формула (2.17) показывает, что при больших значениях H/T , характерных для малых судов, установка пристенных водонепроницаемых бортов в поперечной переборке может обеспечить неоплотнение судна.

Условия (2.5) и (2.14) вводятся в программу расчета главных элементов судна в качестве функциональных ограничений.

2.3.3. Ограничения по начальной остойчивости

Начальная метacentрическая высота не должна быть отрицательной, чтобы при затоплении широкого отсека в средней части судна не уйти до нуля или еще хуже — не превратиться в отрицательную величину. С другой стороны, чрезмерно большая метacentрическая высота снижает,

как это следует из известной каштанской формулы Коутарда $\tau = \frac{B}{\sqrt{h}} c_T$,

непрямую малым период бортовой качки. Поэтому в алгоритме оптимизации метacentрическую высоту, вычисляемую через главные элементы судна, следует ограничить сверху и снизу: $B_{\text{max}} \leq h \leq B_p$. Ограничение метacentрической высоты удобно использовать в неявном виде, переписав его на отклонение шарнира к осадке B/T . Для этого записывают выражение метacentрической высоты, используя эпитрические формулы для метacentрического радиуса ρ и аппликаты центра тяжести x_G . Известное выражение для метacentрической высоты $h = \rho + z_G - x_G$ после замены слагаемых приближенными выражениями [1] дает

$$h = \frac{k_p \sigma^2 B^2}{125 T} + \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\delta}\right)^{1/2} T - \zeta_G \frac{H}{T} \quad (2.18)$$

где k_p — коэффициент, учитывающий векторное увеличение момента инерции площади шпангоута из-за отклонения от симметричной формы. По данным В. В. Ашкана можно получить

$$k_p = \begin{cases} 0,74 + 0,80\alpha - 0,55\alpha^2 & \text{— для выпуклых шпангоутов;} \\ 0,60 + 1,20\alpha - 0,80\alpha^2 & \text{— « вогнутых шпангоутов;»} \end{cases}$$

ζ_G — относительная (выраженная в долях высоты борта) аппликата центра тяжести судна в полном грузе, подсчитывается в зависимости от дефолта. Для различных по назначению судов величина ζ_G определяется по одной из следующих формул:

$$\zeta_G = \begin{cases} 0,65 + 0,14e^{-0,2d}; \\ 0,62 + 0,14e^{-0,2d}; \\ 0,57 + 0,21e^{-0,49d}; \\ 0,54 + 0,21e^{-0,49d}; \\ 0,52 + 0,16e^{-0,62d}; \\ 0,49 + 0,16e^{-0,62d}; \end{cases} \quad (2.19)$$

где d — дефолт, выраженный в тысячах тонн и определяемый приближенно как $1,1$ грузоподъемности судна. Модификации формулы (2.19) соответственно пригодны: для сухогрузных судов нового типа с развитыми грузовыми устройствами, контейнерами крытыми грузовыми ярусами, значительной высотой надводного борта; для сухогрузных судов старого типа; для сухогрузных судов нового типа при перевозках зерна; для сухогрузных судов старого типа при перевозке зерна; для танкеров с мострами изолированного балласта; для танкеров старого типа.

Более достоверные сведения об аппликате центра тяжести могут быть получены путем направления схемы расположения масс на исходном этапе и определения относительного возмущения его центра тяжести, однако при этом усложняется формирование информационной базы; потребуются затраты и время графического изображения.

Подставив обе части выражения (2.18) на шпангоут судна, получим уравнение для дальнейших расчетов уравнение относительной ширины хвоста, так называемое уравнение остойчивости:

$$\frac{h}{B} - \frac{k_p \sigma^2}{125} \frac{B}{T} + \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\delta}\right)^{1/2} \frac{T}{B} - \zeta_G \frac{H}{T} \frac{T}{B} = 0$$

Приведя его к обыкновенному виду, имеем

$$\frac{k_p \sigma^2}{125} \left(\frac{B}{T}\right)^2 - \frac{h}{B} \frac{B}{T} + \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\delta}\right)^{1/2} - \zeta_G \frac{H}{T} = 0 \quad (2.20)$$

или

$$a \left(\frac{B}{T}\right)^2 - b \frac{B}{T} + c = 0$$

Положительный корень уравнения

$$\frac{B}{T} = \frac{b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

и окончательное уравнение (2.20) имеет

$$\left(\frac{B}{T}\right)_{\text{гр}} = \frac{\frac{h}{B} + \sqrt{\left(\frac{h}{B}\right)^2 + \frac{k_p \rho^2}{35} \left(\xi_g \frac{H}{T} - \frac{1}{2} \left(\frac{a}{\delta}\right)^{0,7}\right)}}{k_p \rho^2 / \delta \delta} \quad (2.21)$$

Формула (2.21) показывает, что чувствительность уравнения (2.20) к h/B значительно ниже, чем к любому другому параметру. На рис. 11 приведен результат численного анализа чувствительности относительной ширины по h/B и ξ_g . Видно, что последние в несколько раз выше. Ошибка в оценке метастатической высоты на 10% приводит к изменению B/T всего на 2%, тогда как такая же ошибка в ξ_g вызывает равнозначное изменение относительной ширины. Это значит, что при решении уравнения (2.20) значение h/B можно принимать достаточно приближенно, пользуясь практическими данными для определенных типов судов, в частности с точки зрения плавной качки принимаю $h/B = 0,05$ для сухогрузных судов, 0,11 для мачалочесов и 0,08 для танкеров. Правильное представление о величине метастатической высоты можно получить по проекту, подобному проектируемому судну, по архитектурному типу и размещению верхних грузов. Минимально приемлемым с точки зрения аварийной устойчивости считается $h/B = 0,035$ [1, 32]. Таким образом, ограничение по устойчивости переходит в ограничение по B/T :

$$\frac{0,035 + \sqrt{0,0012 - 4ac}}{2a} < \left(\frac{B}{T}\right)_{\text{гр}} < \frac{0,050 + \sqrt{0,0025 - 4ac}}{2a} \quad (2.22)$$

Видно, что это двустороннее неравенство удерживает B/T в очень узком диапазоне — его крайние значения отличаются всего лишь на 5 процентов. Это позволяет заменить формулу (2.22) уравнением, правая часть которого для B/T :

Может оказаться, что получение по формуле (2.22) значение B/T не удовлетворяет условию аварийной устойчивости при затоплении большого симметричного отсека в средней части судна, поскольку в этом случае при большом отношении ширины к осадке пренебрегает заметное уменьшение поперечного метастатического радиуса. Предельным значением B/T следует считать такое, при котором аварийная метастатическая высота равна до нуля. Записывая выражения метастатической высоты после затопления отсека длиной l_2 в средней части судна, возможно прийти к квадратному уравнению относительно предельного B/T , положительный корень которого ограничивает это отношение сверху:



Рис. 11. Чувствительность B/T к изменению ξ_g и h/B

$$\left(\frac{B}{T}\right)_{\text{max}} < \frac{68A}{k_p^2 T^2 B} + \sqrt{36 \left(\frac{h\delta}{Bk_p^2 T}\right)^2 + 6 \frac{k_p \rho^2 a}{k_p^2}} (1 - \hat{\lambda}_p)^2 \times \times \left(1 + \frac{l_2 \beta_0 k_p \rho^2}{\alpha k_0 - l_2 k_2}\right), \quad (2.23)$$

где $\beta_0 = \beta + 0,02$ — коэффициент поправки сечения затопленного отсека:

$$\hat{\lambda}_p = \frac{h_{\text{зат. отсека}}}{T} = 0,16$$

по Н. Е. Путовой для сухогрузных судов. В каждом конкретном случае может быть уточнено по проекту; k_p — коэффициент проходимости отсека, принимается не более 0,66 для всех типов судов.

Из двух значений B/T , найденных по формулам (2.22), (2.23), в дальнейших расчетах используется меньшее. Если $(B/T)_{\text{max}}$ оказалось менее нижнего значения $(B/T)_{\text{гр}}$, то во избежание чрезмерной ширины судна следует уточнить значение ξ_g неперехваченного судна и довести h/B до 0,035 приемом балласта в двойное дно. Относительная амплитуда ЦТ неперехваченного судна, имеющего $(B/T)_{\text{max}}$, составляет

$$\xi_g = \frac{k_p \rho^2}{12B} \left(\frac{B}{T}\right)_{\text{max}}^2 - \frac{T}{H} - \frac{a}{B} = 0,035 \left(\frac{B}{T}\right)_{\text{max}} \frac{T}{H} + 0,5 \sqrt{\frac{a}{H}} \times \times \frac{T}{H}.$$

Количество потребного балласта $P_0 = D_0(\xi_g + \xi_g) / (\xi_g + k_p/2)$.

Найдем значение B/T обобщенно достаточно плавную качку проектируемому судну и заряду к этому соотношению минимальной устойчивости при затоплении наибольшего отсека в средней части.

2.3.4. Баллы масс судна

Поскольку большая часть составляющих нагрузок судна зависит от его полной массы, сумма всех составляющих разбивается в уравнение

$$D = P_{\text{пр}} + \sum P_i (D, r), \quad (2.24)$$

где D — полная масса судна (водоизмещение); $P_{\text{пр}}$ — независимая от D масса, прямо или косвенно известные из исходных данных; $P_i (D, r)$ — масса, зависящая от водоизмещения, проектных параметров и заданных величин (поперечника, показателя ходкости, удельные расходы топлива, скорости, дальность плавания).

Если раскладку масс производить в соответствии с табл. 7, то можно записать $\sum P_i (D, r) = P_{\text{м.к.}} + P_{\text{с.о.}} + P_{\text{з.у.}} + P_{\text{в.}} + P_{\text{с.к.}} + P_{\text{з.п.}}$, где каждая из

оставляющих вычитается через измеритель и соответствующей ей по физическому смыслу модуль. Рассмотрим составление массы судна по-разному.

Масса металлического корпуса с достаточной точностью определяется формулой $P_{м.к.} = q_{м.к.} L B H \delta (1 \pm 0,02)_{0,05}$, где $q_{м.к.}$ — масса металла в одном кубическом метре объема основного корпуса, или измеритель массы металлического корпуса; L, B, H, δ — теоретические размеры основного корпуса и его коэффициент обшивки пополю на длине между переборками.

Таблица 7. Раскладка масс в начальной стадии проектирования

	По ГОСТ 4.0216-76	$P_{м.к.}$	$P_{об}$	$P_{ДТ}$	P_T	$P_{сн}$	$P_{д.в}$	P_T
Возрастающие по значению	01 Корпус:							
	0101 металлический корпус	*						
	0102 сварочные и фундаменты	*						
	0103 deckные шпангоуты		+					
	0104 неметаллические части		+					
	0105 покрытия, окраска		+					
	0106 выносы изоляции		+					
	0107 воздух в корпусе		+					
	0108 оборудование помещений		+					
	02 Устройства судовых		+					
	03 Системы		+					
	04 ДТ			+				
	05 Электросистемы		+					
	07 Вооружение		+					
	08 Запасные части:							
	0801 устройства		+					
0802 системы		+						
0803 энергоустановки		+	+					
0804 энергоустановки		+						
0806 вооружения		+						
10 Всплыв						+		
11 Занос водонепроницаемых						+		
12 Жидкие грузы:								
1201 в корпусе		+						
1202 в металлических устройствах		+						
1203 в системах		+						
1204 в энергоустановках		+	+					
1205 в энергоустановках		+						
1206 в вооружениях		+						
Уменьшающиеся	13 Снабжение, имущество					+		
	14 Экипаж, расходные грузы и материалы					+		
	15 Груз переносимый						+	
	16 Запас топлива, воды				+			
	17 Переменные жидкие грузы		+					
18 Жидкой балласт		+						

Измеритель $q_{м.к.}$ как и все удельные показатели, подчиняется масштабному эффекту проекирования, т. е. улучшается с ростом абсолютных размеров сооружения. По данным для ответственных судов последние лет постройки можно получить следующие выражение объемной массы металлического корпуса:

$$q_{м.к.} = q_0 \left(0,7 + 0,026 \frac{L}{H} \right) \left(1 + \frac{27,5}{0,0016 L B H + 20} \right) A_1 A_2 A_3 A_4, \quad (2.25)$$

где

$$q_0 = \begin{cases} 100 \text{ кг/м}^3 & \text{— для накатных судов, кавальеронов;} \\ 80 & \text{— " " сухогрузных, танкеров;} \\ 70 & \text{— " " газовозов;} \\ 90 & \text{— " " конвейерозов.} \end{cases}$$

Второй сомножитель формулы (2.25) учитывает влияние отношения длины судна к высоте борта, связанного с общей прочностью судна.

Третий сомножитель — коэффициент масштабного эффекта, дает увеличение замеров при переходе от бесконечно большого судна к судну конечных размеров. Коэффициент полноты основного корпуса δ_0 определяется формулой (2.3).

Коэффициентом A_1 учитывают особенности архитектурно-конструктивного типа:

$$A_1 = \begin{cases} 1 & \text{— для судов с минимальным надводным бортом;} \\ 0,96 & \text{— " " амьтерденных судов;} \end{cases}$$

$$A_2 = \begin{cases} 1 & \text{— " " однокаплевых судов;} \\ 1,06 & \text{— " " двухкаплевых;} \\ 1,12 & \text{— " " трехкаплевых;} \end{cases}$$

$$A_3 = \begin{cases} 1 & \text{— при отсутствии надстроек (гладкокаплевые суда);} \\ 1,02 & \text{— " " относительно дна надстройки } l_{н}/L = 0,2; \\ 1,03 & \text{— " " относительно дна надстройки } l_{н}/L = 0,4; \end{cases}$$

$$A_4 = \begin{cases} 1,02 \pm 1,08 & \text{для П4, П3, П2;} \\ 1,12 \pm 1,10 & \text{" УП и П1;} \\ 1,20 & \text{" УДА.} \end{cases}$$

Окончательная масса металлического корпуса с фундаментами, подкреплениями и металлическими частями надстроек составит:

$$P_{м.к.} = q_0 A_1 A_2 A_3 A_4 \left(0,7 + 0,026 \frac{L}{H} \right) \left(1 + \frac{27,5}{M + 20} \right) M, \quad (2.26)$$

где $M = \frac{\delta_0 L B H}{1000}$ — обобщенный кубический модуль судна. В тех случаях,

когда размеры судна еще не известны, но имеется относительная высота борта и коэффициент обшивки пополю, обобщенный кубический модуль

определяется выражением

$$M = \frac{P_r}{1,035 \varphi_0} \frac{\delta_n}{\delta} \frac{H}{T}$$

Масса оборудования, как это видно из табл. 7, объединяет очень разнообразные статьи нагрузок. С погрешностью около 15% эту массу можно оценить по формуле

$$P_{об} = \varphi_{об} \left(\frac{0,97}{\delta} \frac{H}{T} \right)^{0,8} D_0^{2/3}, \quad (2.27)$$

где $D_0 = \frac{P_r}{\varphi_0}$ определяется с помощью формулы

$$\varphi_{об} = [a_{об} - 0,69 (LBN)^{0,083}] (LBN)^{2/3}, \quad (2.28)$$

где в слове оверда, $a_{об}$ равно 3,52 у сухогрузных судов и лайнерововов, 3,20 у накатных и газозолов, 2,91 у танкеров, 2,65 у нефтерудовозов, кавалочников, 2,14 у контейнеровозов

$$LBN = \frac{D_0}{1,0356} \frac{H}{T} \text{ или } \frac{N}{\delta_n}$$

Первый сомножитель формулы (2.28) учитывает снижение массы оборудования на единицу условной площади $(LBN)^{2/3}$ по мере роста абсолютных размеров судов.

Масса энергетической установки судна зависит от типа ЭУ и мощности главного двигателя $\varphi_{ЭУ} N$, где измеритель массы подчинен масштабному эффекту по мощности. Для оценки массы ЭУ достаточно ориентировочного значения мощности, отражаемого по одной из приближенных формул [1, 58], например адмиралтейской с множителем Сауцера

$$N = \frac{k_{сад} D^{2/3} V^3}{50,1F}$$

где множитель $k_{сад}$ является функцией относительной скорости и учитывает изменение параметров ходкости с ростом скорости. Множитель Сауцера вычисляется по формуле

$$k_{сад} = 0,45 + \frac{1,7}{1 + \exp(7,8 - 22,5Fr)}$$

Здесь число Фруда известно из формулы (2.10), водонивневые определяется через коэффициент увязки.

Для оценки мощности можно воспользоваться значением энергооборуженности (рис. 12). Через ожидаемую мощность подсчитывают измеритель массы СЭУ, т/кВт.

n/D_0 , кВт/м

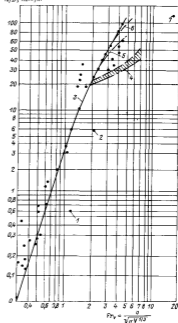


Рис. 12. Зависимость энергооборуженности различных видов транспорта от относительной скорости.

1 — яхта; 2 — вертолет; 3 — высокоманевренные суда; 4 — небольшие суда на воздушной подушке; 5 — суда на подводных крыльях; 6 — глиссирующие суда; 7 — самолеты ИЛ-18; N — мощность старших двигателей; D — полная масса транспортного средства, $V_0 = 8,98$; D — условный объем судна

$$\varphi_{3y} = \begin{cases} 1,2 & \text{для малооборотных дизелей (МОД);} \\ 0,0 & \text{среднеоборотных дизелей (СОД);} \\ 1,96 & \text{портубурных установок (ПТУ);} \\ 1,16 & \text{газотурбинных установок (ГТУ).} \end{cases}$$

Основательно масса энергетической установки составит

$$P_{3y} = \varphi_{3y} (N) N, \text{ т.} \quad (2.29)$$

Запас топлива

$$P_3 = k_{m,1} k_{m,2} k_{m,3} \varphi_{ГД} N \frac{L}{v_3} \quad (2.30)$$

где $k_{m,1}$ — коэффициент морского запаса, принимаемый 1,10—1,12; $k_{m,2}$ — коэффициент, учитывающий расходы на все суточные нужды на ходу и на стоянках, в среднем равен 1,25; $\varphi_{ГД}$ — полезный расход главного двигателя, зависящий от типа и мощности. Для среднегодей $k_{m,1}, k_{m,2}, \varphi_{ГД}$ среднее значение соответствует величинам, приведенным в табл. 1:

$$\varphi_3 = \begin{cases} 238 \cdot 10^{-6} & \text{— для МОД;} \\ 258 \cdot 10^{-6} & \text{— " СОД;} \\ 10^{-6} \cdot 3,18 \exp(-0,302N^{0,4}) & \text{— " ГТУ с регенератором;} \\ 1,61N^{-0,748} & \text{— " ГТУ авиационного типа;} \\ 10^{-6} \cdot 332 \exp(-12N \cdot 10^{-6}) & \text{— " ПТУ с промерзле-} \\ & \text{вом;} \\ 10^{-6} \cdot 379 \exp(-2 \cdot 6N \cdot 10^{-6}) & \text{— " ПТУ с отбором вы-} \\ & \text{сшего пара.} \end{cases}$$

Масса снабжения и запаса водонепонижения составляет по 1% водонепонижения.

Подставив полученные выражения составившими нагрузки в уравнение (2.24) и приведя его к обыкновенному алгебраическому виду, имеем

$$D \left[0,96 - \varphi_0 \left(0,7 + 0,026 \frac{L}{H} \right) \left(1 + \frac{27,5}{0,00097 \frac{\delta_a}{\delta} \frac{P_r}{\varphi_3} \frac{H}{T} + 20} A_1 \right) \times \right. \\ \times A_2 A_3 A_4 0,00097 \frac{\delta_a}{\delta} \frac{H}{H} \left. \right] - \left[\varphi_{00} - 0,69 \left(\frac{0,956 H}{5T} \right)^{0,683} \times \right. \\ \times \left. \left(\frac{P_r}{\varphi_3} \right)^{0,683} \right] \left(\frac{0,956}{\delta} \frac{H}{T} \right)^{2/3} + \frac{k_{m,2} v_3^2}{50,1f} \left(\varphi_1 L + \varphi_{3y} P_3 \right) \times \\ \times D^{2/3} - P_r = 0. \quad (2.31)$$

Обозначив через κ_0 коэффициент при D и κ_{20} — при $D^{2/3}$, можно записать выражение для определения D последовательными приближениями по способу Ньютона с постоянной касательной [18]

$$D_{i+1} = D_i - \frac{\kappa_{10} D_i - \kappa_{20} D_i^{2/3} - P_r}{\kappa_{10}} \quad (2.32)$$

Приближение ведется до получения разницы между D_{i+1} и D_i не более 0,005D. При известном L , δ и D и заданных относительных отклонениях H/T и B/T определяются абсолютные значения B , H , T :

$$B = \sqrt{\frac{D}{k_{m,3} \rho \delta L}} \frac{B}{T}; \quad T = B \frac{T}{B}; \quad H = T \frac{H}{T}.$$

Рассмотренная укрупненная модель используется для оптимизации главных элементов судна при заданном числе заданных величин и параметрах, она может служить и для определения элементов одного из допустимых вариантов судна при автономном (ручном) свете. Система уравнений образуется выражениями (2.5), (2.4), (2.21), (2.23), (2.31), которые алгоритмируются и вводится в подпрограмму FUN (см. с. 96—98, 141). Пешком функции служат приведенные затраты, выраженные в экономической блоке ММС и минимизируемая программа «Пауки» (см. § 3.3 и арал. 1). Вместе с информационным блоком технической, экономической, блок ограничений и блок оптимизации образуют математическую модель проектирования судна (ММПС), укрупненную структурную схему которой приведен на рис. 8. В математической модели судна и оптимизационном блоке содержится операция проверки чувствительности и устойчивости, о целесообразности которых говорится в последующих главах (см. § 4.2). Подобная структурная схема используется в оптимизационном проектировании любого сооружения при постановке в математическую модель выражений, описывающих его свойства. Поэтому аббревиатуру ММПС можно расширить как «математическая модель проектирования сооружений».

Рассмотренная укрупненная математическая модель обеспечивает оптимально главных элементов судна при выполнении требований вместимости, непонижения, устойчивости (в том числе и аварийной), баласта масс.

В детальных моделях проектирования судна в число оптимизируемых переменных стараются исключить все элементы судна, обеспечивающие заданную оценку основных свойств судна. Для этого используют прямые (по теоретическому чертежу) методы расчета вместимости, устойчивости, ходкости судна в разных условиях загрузки, расстановки водонепонижаемых переборок, размещения балластных цистерн с целью минимизации габаритных моментов и т. д. Такая детализация значительно упрощает математическую модель, но повышает достоверность расчетов, поскольку учитывает индивидуальные особенности каждого варианта. При использовании прямых методов приходится выполнять значительную долю графических проработок (теоретический чертеж, размещение основного оборудования и механизмов, схема конструкции корпуса и др.). Необходимым элементом такой работы является диалоговый режим проектирования — ЭВМ, ввод и вывод графической информации. Прямая работа людей по детальным моделям показывает, что их трудоемкость, включая подготовку

алгоритмов, составляет от 15 до 20 тыс. чел.-ч. В особии ограниченного объема нет возможности рассмотреть подобную модель. Показана большая детальность модели и в какой степени не учитывает творческую индивидуальность проектантов. Постоянное появление новых решений, совершенно новых конструкций требует умения создавать самые разнообразные математические модели: и содержащие необходимые и достаточные упрощения, оправданные достоверностью исходных данных, — адекватные модели, и проводящие детальные модели, основанные на прямых методах расчетов.

5.2.4. Оценка экономической эффективности в математической модели судна

Рост доходов и расходов во время эксплуатации судна удобно рассматривать в геометрической интерпретации (рис. 13). Замена ступенчатые кривые дохода I и прибыли P плавными кривыми, получим примерную картину динамики их интегральных значений. Указанные зависимости нелинейны, поскольку за время существования судно подвержено физическому и моральному износу. Физический износ обусловлен коррозией, изменением со временем физических свойств материалов, последствием эксплуатационных нагрузок (астирание, остаточные деформации и и пр.). Этот износ постепенно ограничивает возможности выполнения судном своих функций. Моральный износ связан с износом более совершенных судов, ведущим к снижению потребительской стоимости старых судов.

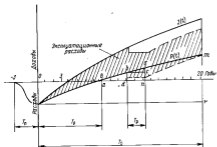


Рис. 13. Динамика доходов судна.

$I(t)$, $P(t)$ — кривые дохода и прибыли в функции времени; T_{op} , T_{or} , T_c , T_p — периоды эксплуатации, окупаемости, службы, ремонта

Из-за кривизны функции распределения дохода (или интеграл интенсивности, характеризующий изменение дохода в единицу времени) имеет экспоненциальный характер $J = b(1 - e^{-at})$, где a и b — параметры процесса. Функция распределения может быть выражена и более удобной показательной функцией $J = \gamma k e^{-\gamma t}$, которую мы используем ниже.

На рис. 14 показано влияние планово-предупредительных ремонтов на поддержание работоспособности судна (кривая 2). Этика интенсивности дохода имеет разрывы, обусловленные выходом судна из эксплуатации на время ремонта (t_1 , t_2 , t_3 — текущие ремонты, связанные обычно с докованием судна, t_{op} — капитальный ремонт). После каждого ремонта судно восстанавливает свою работоспособность, но не до первоначального уровня. За время ремонта судно не получает дохода, который могло бы иметь, поэтому кривая интенсивности к концу периода каждого ремонта уходит под ось абсцисс: недостолезование дохода при оценке эффективности судна целесообразно приравнять к убыткам. При укрупненном анализе экономической эффективности судна ориентиры кривой интенсивности дохода (см. рис. 14) усредняют экспонентой J , а соответствующий ей суммарный доход выражают интегральной кривой 4. Отнимая от ординаты кривой дохода I суммирование на данный момент эксплуатационные расходы, получаем на рис. 13 кривую суммарной прибыли. Характер этой кривой и абсолютные значения ординат индивидуальны для каждого судна. Поэтому удобно рассмотреть гипотетическое «нормативное» судно, удовлетворяющее следующим условиям:

за период существования T_c происходит накопление удвоенной строительной стоимости $2K$, обеспечивающей расширенное воспроизводство;

окупаемость судна, т. е. первый возврат капитальных затрат на его постройку, происходит через восемь лет;

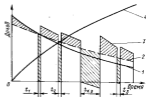


Рис. 14. Влияние ремонтов на интенсивность дохода. 1, 2, 3, 4 — интенсивность 1-го и 2-го текущих и капитального (ремонта).

1 — интенсивность доходами нормативного судна; 2 — интенсивность доходах реального судна; 3 — накопительная интенсивность дохода; 4 — суммарный доход

суммарная прибыль нарастает по показательному закону $P = 0,211K_0 e^{0,25t}$;

эксплуатационные затраты в последнем году существования судна в полтора раза выше, чем в первом году.

На рис. 13 период существования такого нормализованного судна оценивается со дня сдачи судна заказчику. Ордината $0t_0$ символизирует затраты на постройку судна (капитальные вложения). Показан только капитальный ремонт. Его стоимость определяется отрезком AM . За время ремонта T_2 прибыль не поступает, поэтому полная стоимость ремонта условно начисляется как сумма условной прибыли и действительной стоимости ремонта. Такой подход позволяет учесть влияние длительности ремонта на экономические показатели судна. Нетрудно установить целесообразность срока постановки судна на капитальный ремонт. Например, при характеристиках судна, показанных на рис. 13, его нужно ставить на капитальный ремонт не позже одиннадцатого года эксплуатации, иначе кривая прибыли не выйдет в точку M , т. е. не будет выполнено условие расширенного воспроизводства. Можно оценить и величину потери прибыли такого судна за время простоев:

$$\Delta P = \frac{dP(t)}{dt} \Delta T,$$

где ΔT — время простоев (ремонта) в долях календарного года.

Например, если судно стоит 24 млн. руб. ($K_0 = 24$) и на докем году существования выходит в ремонт на 25 сут, то потеря прибыли за это

время составляет $\Delta P = 0,211 \cdot 0,75 \cdot 24 \cdot 9^{-0,25} \frac{25}{365}$, т. е. около

150 000 руб. Хотя цифра эта относится к условному судну, она все же дает представление о минимуме прибыли, которую можно обеспечивать хорошо спроектированным судном. Подстановка вместо ΔT относительную продолжительность рейса, нетрудно оценить минимально приемлемый доход такого судна.

При сроке службы около 20 лет, весьма близком к плавным срокам существования судов транспортного флота, кривая прибыли на участке 5–10 лет мало отличается от прямой, что позволяет считать вариант капитальной за период окупаемости T_0 равномерным или принять коэффициент возврата капитальных вложений (называемый также нормальным коэффициентом эффективности капиталовложений) равным $\theta = T_0^{-1}$. Условно можно считать, что также выгодные отчисления не подлежат рассуждению, поскольку к концу периода окупаемости весьма полезные порей должны быть суммированы, достаточную для заказа нового судна. Формально можно сложить эти отчисления с годовыми эксплуатационными расходами. Получим так называемые приведенные затраты судна. Они и могут служить критерием сравнения вариантов судов с одинаковым годовым объемом перевозок. Часто в процессе проектирования приходится сравнивать суда с разным полезным эффектом (годовой провозоспособностью). Тогда в качестве критерия используют затраты на одну тонну перевезенного груза — удельные приведенные затраты:

$$r = (K_0 \theta + E) G^{-1}. \quad (2.33)$$

где K_0 — строительная стоимость судна (капитальные затраты); θ — нормальный коэффициент эффективности капиталовложений; E — годовые эксплуатационные расходы; G — годовой объем перевозок.

Коэффициент θ взаимосвязан в соответствии с типовой методикой определения экономической эффективности капиталовложений в промышленности 0,12–0,15. Из формулы (2.33) видно, что удельные приведенные затраты есть не что иное, как сумма удельных капитальных вложений⁶, взятых с коэффициентом их годового возврата, и себестоимости перевозок одной тонны груза. Не рекомендуется использовать в качестве показателя полезного эффекта судна число тонно-миль, введенных за год. Такой показатель, удобный для аэрономических целей, непригоден для оптимизации, поскольку в показателе эффективности r трижды внесены внешние характеристики (пропалженность рейсов Z), не связанная с качеством проектного решения и поэтому искажающая влияние проектно-технических элементов судна на экономическую эффективность. В самом деле, при исключении из тонно-миль величины Z войдет в расчет стоимость топлива, величины ходового времени и самостоятельным множителем в расчет объема перевозок. Малая стоимость перевозок автоматически соответствует меньшей дальности перемещения грузов.

При равномерном несении капитальных затрат производится их дисконтирование, т. е. приведение к единому моменту вложения с помощью формулы сложного процента, где учетным процентом служит коэффициент эффективности вложений. Условно считается, что накопления мгновенно превращаются в фонды, тогда 1 руб. вложений в начале некоторого периода, через t лет принесет прибыль и станет эквивалентом $(1 + \theta)^t$ рублям. Поэтому затраты одного рубля сегодня для нас более существенны, чем те же затраты через t лет. Учет стоимости грузов, находящихся в пути, производится таким же путем. Средства, связанные в грузах, влияют на выбор скорости проектируемого судна, поскольку увеличение скорости доставки означает соответствующее изменение оборачиваемости средств народного хозяйства. Стоимость грузов учитывается ко-разному в зависимости от вида их потребления. Учитывая все указанные соображения, условную величину приведенных расходов проектируемого судна целесообразно рассматривать в виде суммы:

$$S_2 = \theta_1 \sum_{i=1}^n \Delta K_i (1 + \theta_1)^{-T_i} + T_0^{-1} \sum_{j=1}^m (1 + \theta_2)^{-T_j} (\Delta K_{Cj} + 0,158 K_C \times X T_{Cj}^{-0,25} T_{Cj}) + E + \theta_2 \sum_{g=1}^r \alpha_g t_g P_g (1 + \theta_2)^{-T_g} T_g, \quad (2.34)$$

где ΔK_i — размер дивиденда на i -м этапе постройки; θ_1, θ_2 — нормативный коэффициент эффективности капиталовложений и нормализованное дисконтирование; n — число этапов за период постройки; T_j — относительный

⁶Обратите внимание на наличие коэффициента дисконтирования.

(в долевых годах) период от момента i -го плазжа до спуска судна закончился; K_i — строительная стоимость судна; E — годовые эксплуатационные затраты, включая амортизационные отчисления в виде некоторой доли K_i ; ΔK_{ij} — стоимость j -го ремонта судна; t_{ij} — относительный период от момента входа в эксплуатацию до окончания j -го ремонта; t_{ij}^* — год существования, на который приходится j -й ремонт; t_{ij}^* — относительный период ремонта; T_i — период существования судна; α_j — коэффициент учета оборотных средств в перевозимых грузах, изменяющийся от 0 до 1 в зависимости от вида груза [24, с. 29]; P_g — цена груза; P_g — масса перевозимого груза в г-м рейсе; ρ_g — относительная производительность g -го рейса.

Формула (2.34) позволяет учитывать при сравнении вариантов не только стоимость материалов, поставок и работ при изготовлении судна, но и технологичность и ремонтопригодность судна. Формулы (2.33) и (2.34) нередко приводят к различным оптимальным решениям.

Выше учитывались потери прибыли от выхода судна в ремонт. С точки зрения экономической науки правильнее сопоставлять сверхприбыль, создаваемую судном-предприятием и определяемую по формуле*

$$\begin{aligned}
 \Pi = & \sum_{i=1}^t \left\{ \omega_i f_i \left(1 - \frac{t_i}{365} \right) - \left[E_i + E_i^* + (\theta_i + \epsilon) K_i \right] \right\} (1 + \theta_0)^{-i} - \\
 & - \omega_i \left(1 - \frac{t_i}{365} \right) \epsilon_i \rho_g \frac{t_i}{365} (1 + \theta_0)^{-i}, \quad (2.35)
 \end{aligned}$$

где t — срок службы судна; ω_i — объем перевозок в i -м году при круглогодичной эксплуатации; E_i — эксплуатационные затраты без отнесения их к ремонту и капитальный ремонт; ϵ — реновационный ставка; E_i^* — затраты на ремонт в i -й год эксплуатации; θ_i — нормальный коэффициент эффективности капитальных вложений; K_i — приведенная к моменту спуска стоимость судна; $K_i = \sum_{j=1}^i K_j (1 + \theta)^j$, где i — время от

определенного этапа до завершения постройки; K_j — размер j -го плазжа; θ_0 — норма дисконтирования; ϵ_i , f_i — цена груза, тарифная ставка за перевозку 1 т груза; t_i , $t_{i, \text{рем}}$ — длительность рейса, длительность ремонта в i -м году.

Последний член формулы (2.35) учитывает средства, связанные в грузы в период транспортирования t_i . Прибыль, которую эти средства приносят бы за год, равна $\omega_i \epsilon_i \rho_g$. За f_i суток эта условная сумма составит $\omega_i \epsilon_i \rho_g t_i / 365$. Расчеты по формуле (2.35) значительно более трудоемки, чем по формуле (2.34), а качественная оценка проектов одинакова.

При проектировании транспортных судов мы обеспечиваем технологичность полезного эффекта, потому что варианты проектно-технологических решений в большинстве случаев как раз направлены на изменение полезного эффекта при переходе от варианта к варианту. Так же невозможно проектировать судна, точно отвечающие заданному ограничению затрат.

Поэтому в проектировании широко применяется невольностью с позиций чистой науки критерий в виде частного отношения затрат к полезному эффекту — условные приведенные затраты.

При проектировании сплавляемых судов строго очерчивается круг решаемых задач. Тогда имеется возможность дивергентировать варианты по заданному полезному эффекту и провести оптимизацию по минимуму абсолютных затрат.

Следует отдать себе отчет в том, что показатели, входящие в целевую функцию, являются приближениями, поэтому всякий раз необходимо определять погрешность оптимизации по выбранному критерию.

2.4.1. Структура условных приведенных затрат

Приведенные затраты включают в себя как одновременные расходы (строительная стоимость судна), так и текущие (эксплуатационные расходы). С позиций экономической науки это разнообразные категории, поэтому их сумма годится лишь для условных сравнений, поскольку сама является чистой условностью.

Вычисление затрат в начальной стадии проектирования возможно по укрупненным нормативам. Модулями при этом являются либо разделы нагрузки, либо водоизмещение судна, либо мощность энергоустановки, либо вместимость, т. е. обобщенные неизвестные проектной задаче [24].

Стоимость сработанного судна определяется суммой пяти укрупненных групп: металлического корпуса $K_{м.к.}$, оборудования судна $K_{об.с.}$, главного двигателя $K_{г.д.}$, оборудования машинно-котельного отделения $K_{м.к.о.}$, работ по судну $K_{р.с.}$. Стоимость конструктивных групп определяется через массу главного двигателя — через мощность, стоимость работ — через водоизмещение порожнего. Таким образом, все расходы на постройку связаны с главными неизвестными, поскольку элементы нагрузки и мощность главного двигателя от них зависят. Стоимость каждой группы определяется как произведение измеритель, возмещающего эффекта масштаба, на модуль (массу укрупненного раздела, водоизмещение, пддлей, мощность): $K_j = \epsilon_j P_j$; $K_j = \epsilon_j N_j$, где ϵ_j , ϵ_j — измерители стоимости, зависящие от типа судна и главного двигателя.

Трудоемкость непосредственно вычисляется по приближенной формуле в зависимости от водоизмещения порожнего судна. Формула строительной стоимости такова:

$$K_c = c_{м.к.} P_{м.к.} + c_{об.с.} P_{об.с.} + c_{г.д.} N + c_{м.к.о.} P_{м.к.о.} + K_{р.с.} \quad (2.36)$$

Выражения для измерительной аттракционировки В. И. Крайнев по статистике отечественного морского флота [24]

Для примера рассмотрим определение строительной стоимости наклонного судна «рз-рз».

Стоимость металлического корпуса*, млн. руб.

$$K_{м.к.} = \left(0,534 + \frac{86}{P_{м.к.}} \right) \frac{P_{м.к.}}{1000}$$

где $1000 < P_{м.к.} < 15700$.

*Формула предложена Л. Б. Брослаком.

*Раскладка масс производится согласно табл. 6.

Оборудование корпуса $K_{об} = (2,731 + 0,194x - 0,083x^2)x$, где x — уменьшения в 1000 раз масса оборудования корпуса, рассматриваемая в пределах от 1,2 до 4,0.

Малобортовой дизель от 800 до 8500 кВт: $K_{ДЗ} = (159,4x - 20,8x^2 + 1,24x^3) \times 10^{-3}$, где $x = 0,001 N$ кВт.

Оборудование и трубопроводы машинного отделения

$$K_{м.о.} = \left(2,35 + \frac{50}{P_{ДЗ}} \right) \frac{P_{ДЗ}}{1000}$$

где $P_{ДЗ}$ — масса энергетической установки судна, т.

Работы по постройке судна: $K_{пр} = 0,345 + 0,225x - 0,007x^2$, где x — масса судна порожем в интервале 1,1—18,6 тыс. т.

Аналогичным образом через характеристики, известные в начальной стадии проектирования, оценивают эксплуатационные расходы. Учитываются норма амортизационных отчислений по основному фонду на ремонт и капитальный ремонт $e_{ам}$, расход на текущий ремонт $E_{т.р.}$, снабжение $E_{сн}$, содержание экипажа $E_{э}$, инвентарные и броскерские $E_{и.б.}$, топливные и бункеровочные расходы E_f . Годовые эксплуатационные расходы таким образом составят:

$$E = e_{ам}K_c + E_{т.р.} + E_{сн} + E_{э} + E_{и.б.} + E_f \quad (2.37)$$

Все шесть слагаемых связаны с главными элементами непосредственно либо косвенно:

амортизационные отчисления определяются типом судна и тем же его элементами, которые учитываются в расчете строительной стоимости. Норма отчислений колеблется от 0,058 до 0,078 в зависимости от типа судна. Нормы периодически пересматриваются и утверждаются правительством [24, с. 256].

годовые расходы на текущий ремонт оценивают в зависимости от назначения судна, типа ЗУ и мощности, а также количества дефлектов, мощность главного двигателя или кубической модуль корпуса. Годовые расходы на текущий ремонт инвентарного судна составляют (в тысячах рублей): $E_{т.р.} = (0,21x^2 + 4,5x - 3) + (4,2 + 16,7x - x^2)1$, где x — дефлекты судна, тыс. т (первая скобка применима для малобортовых дизелей, вторая — для среднбортовых);

расходы на снабжение определяются в зависимости от типа судна, его дефлектов и эксплуатационного периода T_f . Последний, в свою очередь, зависит от дефлектов и мощности судна и определяется по нормативам владельцев судов [24, с. 263]. Для рассматриваемого инвентарного судна годовые расходы по снабжению составляют, тыс. руб.: $E_{сн} = (29 + 0,443\sqrt{P_{ДЗ}}) \times 10^3 \times 0,33$ при дефлектах от 4 до 8 тыс. т;

расходы на содержание экипажа зависят от назначения судна, типа его энергетического, брутто регистровой вместимости, района эксплуатации, численности команды, которая определяется нормами владельцев [24, с. 258]. Используя приближенную формулу для численности команды, а также для рассматриваемого примера

$$E_{э} = (24 + 0,42P_{ДЗ}^{0,37})e_{э} \frac{T_f}{1000}$$

где $e_{э}$ — норма расходов на одного члена экипажа в сутки [24, с. 259]; T_f — эксплуатационный период судна [24, с. 260];

наивыгоднейшие расходы на агентирование судна зависят от назначения судна и его дефлекта

$$E_{аг} = (110 + 0,29P_{ДЗ}^{0,55}) \frac{T_f}{1000}$$

расходы на топливо определяются типом и мощностью энергоустановки, дефлектом полнота и бункеровкой (зависят от бассейна эксплуатации судна) $E_f = 24F_x N_f (e_1 + e_2)$, где T_x — число ходовых суток в году; N — мощность главного двигателя; e_1 — удельный расход на все нужды с учетом мирового запаса, расходов на испарительные механизмы и расходов на стоканга; у малобортовых дизелей это величина удравляется на уровне 235—265 г/(кВт·ч); e_1 , e_2 — цена топлива и стоимость бункеровки, определенные действующими тарифами [24, с. 265].

Таким образом, приведенные затраты капитального судна определяются суммой опционально слагаемых, связанных с характеристиками проектируемого судна.

Для определения объема перевозок Q необходимо знать эксплуатационный период T_f , количество круговых рейсов за год n_f , грузоподъемность судна P_f и коэффициент ее использования η_f . Количество рейсов, в свою очередь, определяется через эксплуатационную скорость V_f , коэфф. грузовой работ M , плечо кругового рейса Z и массу обработанного в рейсе груза ΣP_f :

$$n_f = \frac{2P_f \eta_f T_f}{24V_f + \frac{\Sigma P_f}{M} + \Sigma t_f} \quad (2.38)$$

где P_f — масса груза, обрабатываемая в i -м порту захода; t_f — стояночное время вне грузовой операции в i -м порту.

Как уже отмечено ранее, относительные приведенные затраты к объему перевозок является полезной функцией при оптимизации транспортных судов. Это отношение характеризует рост эффективности в том случае, когда рост полезного эффекта в зависимости от затрат идет по догоняющей кривой (рис. 15). Подобная зависимость, характеризующая процесс насыщения, объективно отражает взаимосвязь между

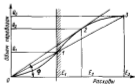


Рис. 15. Подгоняющая зависимость полезного эффекта от затрат.

стг ψ — коэффициент эффективности

затратам ресурсов и пользой от этих затрат. В самом деле, вложенные малые ресурсы в некое мероприятие, трудно ожидать большой отдачи. Лишь с ростом расходов отдача начинает расти. Но не беспредельно — наступает момент, когда увеличение расходов не в состоянии значительно повысить полезную отдачу. Процесс приобретает асимптотический характер. На рис. 15 такому моменту соответствует точка 2. Видно, что при ограничении ресурсов величиной E_1 вариант 2 вообще неприемлем, а в интервале $E_2 - E_1$ он дает меньший полезный эффект, чем решение 3. При всех значениях затрат, меньших E_2 , расходуемостью критерий будет приводить к лучшему варианту. Таким образом, для подавляющего числа решений критерий в виде принятого отношения приводит к правильным выводам. Во то же время он становится бесполезным в задачах, связанных со строго определенной величиной полезного эффекта или экономическим отношением.

В зависимости от целей проектирования применяется большое число других критериев, возможна разработка новых, но все они должны связывать величину полезного эффекта с затратами на него [24, 30, 53]. В общем случае содержание критерия определяет заказчик. Выбранный критерий должен удовлетворять таким требованиям: в наибольшей мере отражать степень достижения цели проектирования; являться функцией оптимизируемых переменных; быть достаточно критичным (чувствительным) к этим переменным.

Важнейшим методологическим принципом определения экономической эффективности новой техники является соблюдение паритета затрат и выгод. Это означает, что полезный эффект и затраты должны суммироваться по всем звеньям производства и эксплуатации, где производится данное сооружение.

§ 2.5. Критерии оптимальности подсистем

Системный подход является основой проектирования сложных систем и одновременно предостерегает использования САПР в проектировании. Рассматривая судно как систему, можно разделить его на подсистемы по функциональному назначению, например, таким образом: корпус, вооружение, техника, обитаемость, перевозимый груз. В свою очередь, каждая из указанных подсистем подразделяется на подсистемы меньшего уровня. Например, подсистема „техника“ включает в себя подсистемы: ЭУ, устройство судна (грузовое, швартовное, якорное и т. д.), систему судна, гидродинамической комплекса и т. д. Последовательное проведение принципа системного подхода к проектированию предостерегает выделение проектирования всех подсистем требования оптимизации судна в целом при одновременной оптимизации элементов судна и его подсистем в рамках одной задачи. На первый взгляд кажется, что при достаточной детализации критерий оптимизации элементов самого судна может служить и критерием оптимизации подсистем. На самом деле это не так. Называя элементы подсистемы (обозначим их A_k , где k — номер подсистемы, i — номер ее элемента), необходимо минимизировать общий критерий

функции $F(x, A_k)$, зависящий от общих элементов судна (определенных на верхнем уровне проектирования) и характеристике подсистем, обозначаемых элементами A_k . Таким образом, изменяя элементы подсистем, мы должны были бы одновременно менять элементы всего судна. Появилось, что решить такую задачу в сколь-нибудь приемлемые сроки практически невозможно и вряд ли целесообразно, поскольку практика проектирования сложных объектов давно пришла к разделению проектирования подсистем: после определения главных элементов судна проектирование подсистем проводится параллельными потоками. Такая практика себя оправдала, она полностью отвечает теоретической установке о необходимости декомпозиции сложной системы для анализа ее характеристик. Итак, подсистемы проектируются независимо друг от друга. Каким же должен быть в таком случае критерий оптимизации i -й подсистемы? Он должен приводить к максимальной эффективности системы — судно — даже в ущерб оптимизации самой подсистемы. Неправильно было бы проектировать, скажем, грузовое устройство судна, добиваясь лишь минимума приведенных затрат на создание и эксплуатацию этого устройства. Изменение элементов устройства влияет за собой определяемые изменения в конструкции корпуса, а использование судна во время грузовых операций, производительности этих операций и, в конечном итоге, и изменению годовой провозоспособности. Изменившись масса корпуса и самого устройства через коэффициент Нормана переходит на подвозимые, затем на скорость либо на мощность и запас топлива. Таким образом изменения в подсистеме, „приводят в движение“ всю систему. Меняются не только элементы, но и характеристики (провозоспособность). Существует еще одно обстоятельство, отсутствующее изменениям в подсистеме: изменяются пределы ограничений на то или иное свойство судна, обеспечиваемое данной подсистемой. Например, устройство усложнителей качки помимо всего прочего позволяет снизить требования к максимальной высоте метацентрической высоты судна: его можно теперь поднять, скажем, за счет увеличения ширины судна, без ущерба плоскости качки.

А что означает изменение границ ограничений с точки зрения оптимизации? Это — изменение пространства проектирования (его расширение или сужение), а следовательно, и возможное изменение в положении оптимума.

Таким образом, при решении задач илкого уровня нужно помимо собственной эффективности подсистем учитывать косвенное изменение эффективности судна в целом, вызванное конкретной подсистемой, во отношении к уровню эффективности, достигнутому при решении задачи высшего уровня.

Отсюда естественно такие требования к критериям оптимизации подсистем, или так называемым локальным критериям [34].

1. Они должны стимулировать выбор таких решений, которые в наибольшей мере отвечают „интересам“ глобального критерия, — условие непротиворечивости.

2. Локальные критерии должны подводить такие решения в подсистемах, которые сужают пространство проектирования для задачи высшего уровня, и наоборот, подводить те решения, которые это пространство расширяют, — условие согласованности.

3. Расчет локального критерия должен быть выполненным в рамках проектируемой подсистемы при минимальном использовании информации, возникающей в результате проектирования других подсистем, — условие параллельной разработки подсистем, или условие автономности.

Первое условие можно удовлетворить, перейдя на расчет глобального критерия (эффективность всего судна) при каждом новом варианте подсистемы, однако два вторых условия таким путем удовлетворить невозможно. В 70-х гг. был высказан [34] в практику проектирования подсистем критерий с маржинальными (краевыми) составляющими. Суть его состоит в том, что приведенные затраты проектируемой подсистемы складываются с частным производным глобального критерия судна, вычисляемым на изменении элементов судна из-за модификации подсистемы, и с частным производным глобального критерия, вычисляемым изменением границ проектирования, также вычисленным изменением подсистемы по отношению к ее составу, принятому при оптимизации элементов судна на верхнем уровне проектирования.

Если обозначить:

$f_k(x_k)$ — абсолютные приведенные затраты по k -й подсистеме;
 $f(x^0, \bar{x}_k)$ — абсолютные приведенные затраты по судну, где x^0 — его оптимальные главные элементы, определяемые на верхнем уровне внутренней задачи проектирования, а \bar{x}_k — элементы k -й подсистемы, зафиксированные в виде параметров при решении этой же задачи верхнего уровня;

$df_k(x_k, \bar{x}_k)$ — изменение значения S -го ограничения в задаче верхнего уровня, вызванное переходом f -го элемента k -й подсистемы от значения x_k к x_k ;

$\frac{df(x^0, \bar{x}_k)}{dS}$ — частная производная глобального критерия по S -му ограничению в задаче верхнего уровня, представляющая собой цену глобального критерия (руб./, руб./л., руб./коэффициент, руб./м³, руб./высотный руб. и т. д.) за единицу измерения S -го ограничения (единицу масс, объема, единицу метрической высоты, метр надводного борта и т. п.);

S_1 — множество ограничений задачи высшего уровня, выполняемых в виде строгих равенств;

S_2^* — те же множества ограничений ЗВУ в виде равенств, которые проектируют смещению глобального оптимума в сторону лучшего значения критерия оптимизации судна (например, в задаче высшего уровня найдены оптимальные размеры судна с минимальной остойчивостью, тогда смещение верхней границы для метacentрической высоты A_{max} никак не влияет на положение оптимума, и считается $\frac{df(x^0, \bar{x}_k)}{dA_{max}} = 0$);

I — подмножество элементов судна, претендующих прямо пропорцельно из-за применения k -й подсистемы (например, увеличение длины и ширины судна из-за изменения типа главного двигателя):

χ — коэффициент приведения к одинаковым единицам измерения всех членов правой части выражения (2.39). При условии, что глобальный критерий складывается из руб./л., а χ — годовая провозможность судна, — все слагаемые в формуле локального критерия сводятся в руб./л., выведем общую формулу для критерия подсистемы

$$df_k(x_k) = f_k(x_k) + \chi \left\{ \sum_{s \in S_1} \frac{df(x^0, \bar{x}_k)}{dS_s} df_s(\bar{x}_k, x_k) - \sum_{s \in S_2^*} \frac{df(x^0, \bar{x}_k)}{dS_s} \chi \times df_s(x_k, x_k) \right\} + \chi \sum_{i \in I} \frac{df(x^0, \bar{x}_k)}{dX_i} dX_i(\bar{x}_k, x_k). \quad (2.39)$$

Здесь второе и третье слагаемые — маржинальные приращения. Их знаки определяются следующим соотношением: для ограничения типа равенства S_1^* любое приращение границ должно вести к снижению численного значения целевой функции (ЦФ), поэтому появляется знак „минус“; для ограничения типа равенства любое нарушение по смыслу должно ухудшить оптимальный вариант, т. е. приводить к возрастанию затрат по судну, и это слагаемое вводится со знаком „плюс“.

Как видно из формулы (2.39), единственную трудность вычисления критерия оптимальности подсистемы представляет маржинальные приращения. Они определяются численным экспериментом с оптимизационной моделью судна либо с судном-прототипом. В первом случае производится серия оптимизационных расчетов, в которых определяют оптимальные элементы x^0 и значения приведенных затрат по судну $df(x^0, \bar{x}_k) = f(x, dx_k) - f(x^0)$. В качестве df_s принимаются приращения приращающей части ограничений (таш $x_s(x, x_k) \geq \geq b_s$), введя с обратными знаками. Получаем зависимость df от df_s дает возможность рассчитать местные производные и выявить область их устойчивости. Во втором случае выдают „исправленный“ в судно-прототип в соответствии с нужным df_s , и определяют приращение критерия его экономической эффективности.

Разработчик подсистемы должен иметь маржинальные производные до начала проектирования, они вводятся в качестве заданных величин. Рис. 16 показывает путь из экспериментальных значений

$$df = \varphi(df_s) = \varphi \left[\left(\frac{\Delta}{B} \right)_{max} \right]$$

т. е. изменение приведенных затрат резервно остойчивого судна при смещении верхней границы относительной



Рис. 16. Прямые зависимости относительных затрат от приращения верхнего ограничения метacentрической высоты

метациркульной высоты (ОМЦВ). Видно, что при увеличении допустимого значения ОМЦВ улучшается экономическая эффективность судна. Так как ОМЦВ выражается в долях ширины судна B , то маржинальная производная составляет $1,33 \frac{\text{руб./т}}{\text{см}}$ и при $B = 25$ м численно равна

$1,33/100 \cdot 25 = 0,000532$ руб./т за 1 см метациркульной высоты. Следовательно, лобовая обшивка экономичнее в заданном пределе метациркульной высоты на один сантиметр (хотя бы за счет применения усовершенствованной шпарты) можно выиграть в удельных приведенных затратах $5,32 \cdot 10^{-4}$ руб./т. При годовой провозной способности судна 176 000 т мы

выиграем в абсолютном выражении $\chi \frac{df(x^0, X_0)}{d\theta} d\theta = 176 000 \times$

$\times 0,000532 \cdot 1 = 93,63$ руб. Эту цифру со знаком «минус» нужно поставить на место третьего члена формулы приведенных затрат усовершенствованной конструкции. Теперь, предположим, на том же судне после установки нового подруливающего устройства метациркульная высота повысилась бы до 85 см, т. е. превысила на 5 см предел, принятый ранее при оптимизации элементов судна. Тогда мы проиграли бы в приведенных затратах $176 \times 10^3 \cdot 5,32 \cdot 10^{-4} \cdot 5 = 468,16$ руб. Эта цифра со знаком плюс должна занять место третьего слагаемого в формуле (2.39) при подсчете критерия оптимальности подруливающего устройства. В источниках [34, 35] приводятся маржинальные производные, полученные малым экспериментом с моделями некоторых типов судов. Их можно использовать при согласованной оптимизации подсистем соответствующих типов судов.

5.3.1. Методы математического программирования

При оптимизации проектного решения прежде всего необходимо выделить некоторый набор независимых переменных (главных неизвестных, проектных переменных) x_1, x_2, \dots, x_n , значения которых определяют основные свойства проектируемого изделия. Выбор их значений представлен пространству. Набор и число $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ может быть представлен точкой в n -мерном Евклидовом пространстве E^n . Тогда условия и ограничения, накладываемые на возможные значения главных неизвестных зададут в E^n некоторую область G , которой точка x должна принадлежать. Эту область при числе главных неизвестных более двух называют пространством проектирования. Критерий сравнения (целевая функция) представляется в виде числовой функции $\Phi(x) = \Phi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ от n главных неизвестных. Считается, что решение $x^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ лучше, чем решение $x^{(1)} = (x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_n^{(1)})$, если $\Phi(x^*) > \Phi(x^{(1)})$.

Рассмотрим геометрическую интерпретацию простой задачи оптимального проектирования изделия, характеризующуюся всего двумя проектными переменными. Математически задача заключается в выборе вектора $x(x_1, x_2)$, область изменения которого определяется заданными ограничениями. Пусть эти ограничения имеют вид $|x_1 - 12x_2 + x_2 + 16 \leq 0$; $-0,5x_1 - 0,9x_2 + 4,5 \leq 0$; $x_1 \geq 0$; $x_2 \geq 0$.

Предположим, что целевая функция, которую требуется максимизировать, в этой задаче квадратичная:

$$\Phi(x_1, x_2) = -[(x_1 - 12)^2 + (x_2 - 7)^2]. \quad (3.1)$$

На рис. 17, а приведена пространственная схема изменения функции цели (3.1) над областью изменения независимых переменных, а также

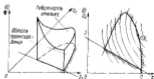


Рис. 17. Поверхность функции цели (жесткость отбоя) над допустимой областью независимых переменных: а — пространственная схема; б — плоское изображение

проекция этой поверхности (рис. 17, б) на область проектирования в виде изолиний (уровней постоянных значений целевой функции). На рис. 17, б область возможных сочетаний независимых переменных ограничена шарнирной. Исходные в данном случае представляются концентрическими окружностями с центром $(x_1, x_2) = (12; 7)$. Видно, что максимальное значение целевой функции для x_1 и x_2 , не выходящих за область ограничений, составляет $\Phi(x^*) = -29$, а оптимальные проектные переменные равны $x_1 = 7$, $x_2 = 5$. Задача нелинейного программирования решена. В ней ограничения и целевая функция нелинейны. Размерность задачи — два, функция цели трехмерна. При числе главных неизвестных более двух, образуется пространство проектирования, а целевая функция отображается гиперповерхностью (не поддающейся изображению на рисунке), называемой часто поверхностью огибающей. В таком случае определить положение экстремума поверхности целевой функции удобнее всего методами математического программирования.

Способ описания оптимального решения зависит от вида ограничений оптимизируемых независимых переменных и типа целевой функции. Если целевая функция и ограничения линейны относительно оптимизируемых переменных, то описание экстремального значения целевой функции над их допустимой областью называют линейным программированием. В практике проектирования такие задачи почти не встречаются. Даже в простейшем случае присутствует нелинейность хотя бы в одном из указанных элементов оптимизационной задачи. Математическое программирование называют нелинейным, если целевая функция или хотя бы одно ограничение нелинейны или полинемны (содержат произведение аргументов) относительно оптимизируемых переменных. В проектировании судьи приходится иметь дело именно с таким типом задач. Реальная проектная задача обязательно охватывает размеры и ограничения, связанные с дискретностью многих параметров, обусловленные ступенчатым изменением характеристик конструктивных модулей, мощностей рядов двигателей и т. п. Среди независимых переменных часто дискретны. В таких случаях естественно применять методы адаптивного программирования, т. е. нелинейного программирования, в котором набор возможных значений оптимизируемых переменных, параметров или нормативов задается в виде матрицы дискретных величин. Универсальными для таких задач являются алгоритмы случайного поиска, в которых шаг оптимизации K дискретных переменных определяется как $\lfloor \frac{1}{2} \rfloor \Delta = j^* P + n_j V^M$, где n_j — число значений j -й дискретной переменной; j^* — индекс j -й дискретной переменной в таблице их значений (матрице индексов, ранга $K \times n$), $1 \leq j^* \leq n$; $\lfloor \frac{1}{2} \rfloor$ — индекс дискретной переменной, соответствующей лучшему значению ЦФ, полученному в предыдущем шаге оптимизации; V — случайная величина в интервале от -1 до $+1$; M — число положительное четное число.

Другой модификацией целочисленного программирования является так называемый метод дискретно-непрерывного нелинейного программирования [45], т. е. нелинейного программирования при дискретных и непрерывных независимых переменных, рассматриваемый ниже в § 3.2.



Рис. 18. Поиск плана минимумы на плоскости минимуму

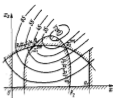


Рис. 19. Уменьшение ЦФ над областью возможных значений переменных (защрахованная индикаторная область)

Поскольку положение экстремума целевой функции определяет положение оптимальа задачи, то прежде всего представляет интерес форма гиперповерхности, описываемой целевой функцией. С математической точки зрения она представляет собой $(n+1)$ -мерную поверхность. Значения целевой функции определяются проекциями переменными $\Phi = \Phi(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

В дальнейшем будем рассуждать минимумы целевой функции, предполагая, что в проективном случае произошло преобразование (рис. 18) $F(x) = -\Phi(x)$.

При поиске оптимальных проектных решений следует различать локальный и глобальный оптимумы. Глобальным оптимумом x^* в пространстве проектирования G называется такая точка, которая удовлетворяет критерию

$$F(x^*) \leq F(x); \quad (3.2) \\ x^* \in G, \quad x \in G,$$

где $F(x)$ — значение критерия оптимальности, соответствующего любой из остальных точек пространства проектирования. Целью решения задачи



Рис. 20. Минимизация ЦФ над областью независимых переменных $0 < x_1 < 8$ и $0 < x_2 < 8$

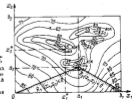


Рис. 21. Четырехэкстремальная ЦФ

оптимального проектирования является нахождение глобального оптимума, однако значительная часть алгоритмов осуществляет поиск локальных оптимумов, т. е. таких, для которых неравенство (3.2) выполняется лишь в некоторой части пространства проектирования. Часто при решении задачи отыскание только одного локального экстремума оказывается недостаточным. Требуется найти большинство локальных оптимумов и показать, что среди оставшихся невыявленными нет глобального. Такая задача может быть решена только приближенно (с определенной вероятностью пропуска глобального оптимума), что обусловлено сложностью топологии целевой функции, либо многозначностью пространства проектирования, либо тем и другим одновременно. Тогда экстремальные области приходится находить и разделять численными методами.

На рис. 19 показан случай одноэкстремальной (унимодальной) целевой функции над несвязной (сдвинутой) внешней стороны граничной допустимой областью. Каждый из двух составляющих проективной области имеет свой оптимум x_1^{opt} и x_2^{opt} . Поскольку $F(x_1^{opt}) < F(x_2^{opt})$, точка x_1^{opt} является и глобальным оптимумом. На рис. 20 показана многоэкстремальная бимодальная ЦФ над односвязной областью проектирования двух независимых переменных x_1 и x_2 . Здесь поверхность ЦФ имеет два локальных минимума (бимодальная целевая функция). Глобальный оптимум для данной области переменных ($x_1 \in a_1$; $x_2 \in a_2$) определяется после сравнения значений ЦФ в локальных оптимумах. На рис. 21 представлена четырехэкстремальная ЦФ. Глобальным для данной области проективных переменных является оптимум при x_1^{opt} . Оптимальными являются значения переменных x_1^* и x_2^* . Рассмотрев простые двумерные задачи, когда поверхность ЦФ можно построить. Значительно сложнее отыскать глобальный оптимум в многомерном проективном пространстве. С увеличением количества оптимизируемых переменных и числа ограничений проектного пространства быстро растет объем вычислений. Часто узлов, которые нужно перебрать, используют, например, метод сеток, определяется степенью функции с показателем, равным размерности^{*)} пространства проектирования. Поиск лучшего решения для каждой, характеризующегося тремя оптимизируемыми переменными при десяти значениях каждой из них, потребует изучения $3^{10} = 59048$ решений. Если же проектное пространство образуют семью координатных L, R, T, N, S, a, β , то придется просмотреть $7^{10} \approx 2 \cdot 10^8$ решений. Понятно, что здесь могут помочь только специальные методы поиска оптимума.

В соответствии с порядком используемых производных ЦФ все методы оптимизации можно разделить на три группы:

прямые методы (часто называемые также методами нулевого порядка), основанные на сравнении вычислительных значений ЦФ над различными точками области проектирования;

методы первого порядка, использующие первые производные ЦФ;

^{*)} В математическом смысле размерность задачи равна числу независимых переменных — по аналогии с физической размерностью, определяющей величину измеряемой (основных) единиц измерения.

методы второго порядка, использующие вторые производные ЦФ.

Нередко вступают в противоречие методы оптимизации — так называемой группы косвенных методов поиска оптимума. Совершенно очевидно, что использование косвенных методов требует достаточно полного представления о характере поверхности, описываемой целевой функцией, для определения областей непрерывности и дифференцируемости, классификации точек разрыва функции, определения локальных экстремумов и точек седловатости поверхности. Все эти операции при многомерных и разноразмерных ограничениях на пространстве проектирования делают задачу настолько громоздкой и сложной, что пользование косвенными методами оптимизации теряет практический смысл. Их употребляют как вспомогательное средство для уточнения местоположения оптимума, найденного прямыми методами.

§ 3.2. Практические способы поиска оптимума

Прямые методы называют еще методами поиска [51]. В типичном методе поиска направленной минимизацией определяется на основании последовательных вычислений ЦФ. Сами прямые методы подразделяются на две подгруппы: поиск при отсутствии ограничений и при наличии ограничений. Нас естественно интересует последняя подгруппа. Она насчитывает более 15 видов алгоритмов, предложенных в разное время для решения определенных задач [23, 28, 42—44, 48, 51, 55]. Почти все они достаточно подробно проанализированы в монографии [51]. Ниже в § 3.3 в качестве примера рассмотрен один, достаточно широко применяемый экспериментально при решении задач оптимального проектирования судно и пригодный для практического определения оптимума в других задачах проектирования способ сопряжения направлений "Даунли".

Задача нелинейного программирования формулируется следующим образом: минимизировать

$$F(x), x \in E^n \quad (3.2)$$

при m -линейных и (или) нелинейных ограничениях в виде равенств

$$h_j(x) = 0, j = 1, \dots, m \quad (3.4)$$

и p -нелинейных и (или) нелинейных ограничениях в виде неравенств

$$g_j(x) \geq 0, j = m+1, \dots, p. \quad (3.5)$$

Решение задач с ограничениями часто базируется на использовании штрафных функций — добавок к решению тех же задач без ограничений типа (3.5). Таким образом, если $F^*(x)$ есть решение (3.3) и (3.4), то для учета ограничений (3.5) преобразуем критерий оптимальности $F(x)$ так, чтобы нарушение ограничений вызывало рост критерия, а соблюдение привело бы $F(x)$ к $F^*(x)$. Для этого минимизируют новый критерий в виде

$$F(x, r_k) = F(x) + r_k \sum_{i=1}^p G[g_i(x)], \quad (3.6)$$

где G — функция от i -го ограничения, стремящаяся к 0, когда $g_i(x) \geq 0$ и

$k \rightarrow \infty$, когда $g_j(x) < 0$; r_k — масштабный коэффициент, пропорциональный последовательно убывающей величине с ростом числа шагов оптимизации.

Каррел [51, с. 341] предлагает считать штрафную добавку в виде $r_k \sum_{m=1}^p \frac{1}{g_l(x)}$. Тогда критерий оптимизации в задаче (3.3), (3.4), (3.5) будет

$$P(x, r_k) = F(x) + r_k \sum_{m=1}^p \frac{1}{g_l(x)}, \quad (3.7)$$

где r_k выполняет роль „весового“ отношения между численными значениями ЦФ и штрафного члена (рекомендуется принимать $1 > r_k > 10^{-4}$). Повсеместное использование критерия (3.7) простым примером. Пусть требуется определить минимум функции $F(x) = ax$ при условии $x \geq b$, т. е. $g(x) = x - b \geq 0$. Перейдем к решению задачи без ограничений, используя новую целевую функцию

$$P(x, r_k) = ax + \frac{r_k}{x - b}.$$

Задавая значениям r_k от 0,1 до 0,0001 можно достаточно близко спуститься к действительному минимуму функции $F(x)$ с ограничением $g(x)$, что хорошо видно на рис. 22. Например, если $a = 4$, $b = 2$, то при

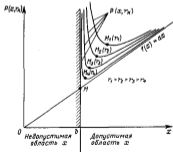


Рис. 22. Преобразование линейной функции со штрафным членом к истинному минимуму

$x = 2,01$ и $r_k = 0,01$ $P(x, r_k) = 9,04$; $r_k = 0,001$ $P = 8,14$; $r_k = 0,0001$ $P = 8,05$. Действительный минимум равен 8 при $x = 2$. При k независимых переменных каждому r_k соответствует слой $(k+1)$ -мерная поверхность функции $P(x, r_k)$, и в предельном случае $P(x, r_k) \rightarrow F(x)$. Если в данном примере начать поиск решения со значения $x < 2$, т. е. из недопустимой области, то с помощью ЗМ не удастся найти решение, поскольку функция $P(x, r_k)$ имеет разрыв ($P(x \rightarrow 2) = \infty$), и нет указаний о дальнейших шагах в расчетной схеме. Чтобы обойти это препятствие Каррел [51] предложил ввести условный переход между границами:

$$G[g_j(x)] = \begin{cases} |g_j(x)| & \text{при } g_j(x) \geq \epsilon; \\ \frac{1}{2\epsilon - g_j(x)} |\epsilon^2| & \text{при } g_j(x) < \epsilon, \end{cases} \quad (3.8)$$

где ϵ — положительная малая величина, подбираемая для каждого r_k отдельным путем.

Если теперь начать процесс оптимизации из недопустимой начальной точки (при $g_j(x) < 0$), то штрафной член превратит большое положительное значение ϵ в том направлении, чем дальше от границы находится исходная точка. Это заставит вектор независимых переменных кратчайшим путем войти в допустимую область (рис. 23).

Существует ряд других модификаций штрафных функций [12, 14] для критерия (3.7). Они здесь не рассматривались, поскольку имеют тот же смысл, что и формулы Каррел, использованные в градиентном методе алгоритма „Пауэлл“.

Вводя штрафную функцию, остается найти минимум безусловной невыпуклой функции $P(x, r_k)$.

В пространстве n оптимизируемых переменных любой точке x соответствует значение ЦФ $P(x)$ и направленный в эту точку из начала координат вектор $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$, образованный проекциями точки на координатные оси. Две точки пространства x_k и x_{k+1} связаны векторным соотношением $x_{k+1} = x_k + A_k = x_k + \lambda_k \xi_k$, где направление вектора $A_k = x_{k+1} - x_k$ длиной $\lambda_k = |A_k|$ определяется единичным вектором $\xi_k = A_k / |A_k|$. Проекции длины вектора связаны с проекциями на соответствующие направлениями $\Delta \lambda_k = \lambda_k \xi_k = \Delta \lambda_k \cos \varphi_k$, где φ_k — угол между положительным направлением i -й координатной оси и направлением вектора ξ_k . Большинство численных методов минимизации программирования сводится к выбору на каждой k -й итерации вектора ξ_k направления и одномерного поиска из точки x_k минимума ЦФ в этом направлении. Последовательность таких итераций приводит в конечном счете к локальному минимуму ЦФ, а различие между методами минимизации в основном связано с методикой выбора направления и одномерного поиска на каждой итерации.

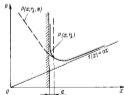


Рис. 23. Переходы линейной функции $P(x, r_k)$ при штрафной добавке в форму Каррел

Существенное значение имеет выбор начальной точки x_0 , определяющей время и, при многоэкстремальности ЦФ, результат оптимизации. Так как не существует общего подхода к определению точки x_0 , то ее выбирают случайно или аналитически исследуют функцию в области допустимых решений, грубо определяют область нахождения минимума или, по крайней мере, монотонного изменения и выбирают начальную точку на границе этой области.

При наличии дискретных независимых переменных в штрафную функцию добавляют еще одно слагаемое $Y_k = S_k \theta_k(x^d)$, которое штрафует ЦФ при отступлении независимых переменных от указанных дискретных значений. Это слагаемое обладает следующим свойством

$$\theta_k(x^d) = \begin{cases} 0, & \text{если } x^d \in R^d, \\ > 0, & \text{если } x^d \notin R^d, \end{cases} \quad (3.9)$$

т. е. при значениях переменных, соответствующим одному из элементов матрицы дискретных величин, θ_k становится равным нулю, в противном случае больше нуля. Таким образом, слагаемое $S_k \theta_k(x^d)$ должно „ловушка“ поворачивать ЦФ в интервалах между дискретными значениями переменных. Такую требованию хорошо удовлетворяет β -функция типа

$$\theta_k(x^d) = \sum_{j \in D} \{ 4q_j (1 - q_j) \}^{\beta} \delta_k,$$

где $q_j = (x_j - x_j^*) / (x_j^* - x_j^{\#})$; x_j^* , $x_j^{\#}$ — две соседних дискретных величины; $x_j^* \leq x_j$ и $x_j^{\#} \geq x_j$; $\delta_k > 1$; x_j — текущее значение независимой переменной.

Рис. 24 показывает поведение β -функции при разных значениях β_k . После введения дополнительного штрафного члена целевая функция (3.7) получит вид

$$P(x, r_k, S_k) = F(x) + r_k \sum_{m=1}^p G|g_m(x)| + S_k \sum_{j \in D} (4q_j - 4q_j^{\beta}) \delta_k, \quad (3.10)$$

где J — индекс дискретных переменных, принадлежащий заданному множеству индексов D .

Пример использования формулы (3.10) для оптимизации характеристик элементов конденсаторов дан в § 5.2.

Какой алгоритм нелинейного программирования использовать при решении конкретной задачи? Критериями оценки алгоритмов могут служить совокупность показателей: пригодность алгоритма для решения широкого круга задач, число необходимых вычислений целевой функции, минимальное время, необходимое для реализации алгоритма в пределах желаемой точности; время



Рис. 24. Характер нормализованной β -функции при изменении β_k .

подготовки задачи. Для пользователя наиболее существенными являются первый и четвертый показатели. Простота показывает, что не существует алгоритмов, пригодных для любого типа задач. В то же время многократными экспериментами установлено возможность широкого использования алгоритма „Лауэлл“ для решения оптимизационных задач проектирования. Т. Шун [57] рекомендует при решении задачи использовать сразу несколько алгоритмов, осуществляя переход от одного к другому путем замены в основной программе обращения к подпрограмме.

§ 3.3. Прямой метод последовательного безусловного поиска „Лауэлл“

Главной особенностью метода „Лауэлл“ является сведение задачи многомерной оптимизации к последовательному одномерному поиску вдоль сопряженных направлений.

Доказано [55], что для поиска экстремума n -мерной квадратичной целевой функции достаточно только один раз перебрать все ее в сопряженных направлениях. Используются следующие теорема: если при начальной точке поиска x^0 в направлении S минимум квадратичной функции $f(x)$ находится над некоторой точкой $x^{(1)}$ и если при начальной точке поиска $x^{(1)}$ в том же направлении S минимум $f(x)$ находится над точкой $x^{(2)}$, то при $x^{(1)} < x^{(2)}$ направление $S_1 = \overline{x^{(1)}} - \overline{x^{(0)}}$ содержит $0 \in S$.

Суть метода „Лауэлл“ легко понять из рис. 25. Из начальной точки x_0^0 по выбранному первому направлению S_0^0 проводится одномерный поиск минимума, т. е. минимизируется $f(x_0^0 + \lambda S_0^0)$ по параметру λ и определяется x_1^0 . Из найденной точки $x_1^0 = x_0^0 + \lambda_1^0 S_0^0$ проводим аналогичные действия в направлении, ортогональном первому (на исключенном этапе поиска вместо сопряженных направлений используются ортогональные), и получаем точку одномерного оптимума x_2^0 . Далее заменяем одно из исходных направлений S_1^0 на $S_1^1 = \overline{x_1^0} - \overline{x_0^0}$, а другое оставляем без изменения. Проводя одномерный поиск вдоль нового направления S_1^1 , находим точку одномерного оптимума x_3^0 . Повторив указанную последовательность действий n раз, находим направление S_1^n , сопряженное с направлением S_0^0 , одномерный минимум M на этом направлении является одновременно минимумом квадратичной функции.

Для одномерного поиска вдоль направлений используется метод ДСК „Лауэлл“ (рис. 26). Выбирается точка x_0 и вычисляется значение ЦФ $f(x_0)$ (точка 0), деления шаг Δx в произвольном направлении и вычисляется значение $f(x_0 + \Delta x)$ (точка 1). Если $f(x_0 + \Delta x) > f(x)$, то вместо Δx берется $-\Delta x$. Если $f_{m+1} < f_m$ удаляют Δx и

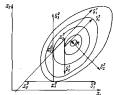


Рис. 25. К методу „Лауэлл“

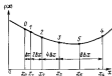


Рис. 26. Стандартный шаг ищется по методу "Пауэлл" Девиса—Стеина—Коппа и Паркса

соответствует выбранному значению $f(x)$. Стена проводит квадратичную аппроксимацию и проверку, пока не будет выполнено требуемое условие.

Прямой метод последовательного безусловного поиска "Пауэлл" [51] модифицирован Б. А. Цыбенко и И. В. Стрелисовским в 1979 г. [55]. Алгоритм реализован в виде пакета программ на алгоритмическом языке FORTRAN-IV*. В пакет входят шесть подпрограмм: B4PERB, B4NAPR, B4PROV, B4PEN, FUN и MAIN. Все они, кроме FUN и MAIN, осуществляют собственно процесс поиска оптимума, являясь стандартными для любой задачи, должны быть закомпилированы и постоянно храниться во внешней памяти ЭВМ. Проблемо-ориентированным является только программа: FUN — вычисляющая значение целевой функции, а MAIN — управляющая вводом и выводом. Эти подпрограммы обмениваются при изменении задачи параметрами.

Головная подпрограмма MAIN содержит такие управляющие переменные:

- N — число независимых переменных;
- IPRIN — флажок печати: если IPRIN = 1, то производится печать промежуточных итераций, иначе печатается только конечный результат;
- ICONV — количество уменьшений коэффициента штрафа R; не должно быть более двух;
- NPRIV — размерность массива данных (входных) пользователя, передаваемых в подпрограмму FUN;
- STEPS — начальное значение шага по независимым переменным;
- FACTR — значение коэффициента штрафа; рекомендуется от 0,01 до 0,001;
- ACC — требуемая точность поиска экстремума; рекомендуемое значение $10^{-3} - 10^{-6}$.

Для работы подпрограммы MAIN необходимо организовать ввод в нее четырех групп данных, прием порядка ввода не имеет значения, он лишь должен соответствовать операторам READ (с. 151, перф. 20, 23,

*См. рисунок 1. Числа, установленные авторами в версии FORTRAN при работе программ должны использоваться координатами программы вычислительного центра.

30, 35). Первая группа — это управляющие переменные. Вторая группа — координаты начальной точки $X(X_1, \dots, X_N)$, т. е. независимые переменные. Третья группа — масштабированные координаты начальной точки $XM(XM_1, \dots, XM_N)$. Четвертая группа — входные данные для расчета ЦФ, их целесообразно вводить отдельным массивом, размерность которого указывается (в зависимости) в управляющих переменных NPRIV. После ввода данных группы данных предусмотрен их контрольный вывод (см. рисунок 1).

Об оптимальном процессе обмена информацией между подпрограммами осуществляется через оператор COMMON (THREE), зависящий от перфокарт под номерами 17 в MAIN, 2 в B4PERB, 5 в B4NAPR, 4 в FUN, который остается неизменным при решении любой задачи. Результаты расчета из подпрограммы FUN в MAIN для возможности их дальнейшего вывода на печать передаются через оператор COMMON, определяемый пользователем. В конце MAIN пользователь организует вывод результатов решения оптимизационной задачи в виде, удобном для чтения.

Все переменные нужно привести к величинам, близким к единице (масштабировать) путем деления их координаты начальной точки или масштабированный оптимальный вектор независимых переменных: $X(I) = X(I)/XM(I) = 1$, где $X(I)$ — вектор независимых переменных; $XM(I)$ — координаты начальной точки.

В конце MAIN перед печатью результата необходимо ввести обратное преобразование независимых переменных.

Аналогичное преобразование, но обратного порядка, необходимо выполнять в подпрограмме вычисления ЦФ FUN. Подпрограмма FUN (X, F, NV, REST, NC) содержит следующие формальные параметры:

- X — масштабированный нормализованный вектор независимых переменных;
- F — этому оператору присваивается вычисленное значение ЦФ;
- NV — размерность вектора независимых переменных;
- REST — индикатор массива ограничений;
- NC — количество (размерность) ограничений.

Начальные данные из головной подпрограммы в FUN, являющиеся значением целевой функции, передаются через оператор COMMON, определяемый пользователем (операторы 0004 и 0005 на с. 151, 152).

Формирование штрафной добавки к ЦФ осуществляется с помощью стандартной подпрограммы B4PEN.

Выражения ограниченной аргументности независимых переменных формулируются таким образом, чтобы в случае их выполнения значение ограничения становилось положительным, а при нарушении — отрицательным. Желательно эти выражения нормировать, чтобы абсолютные значения всех ограничений были примерно одного порядка при отклонении ограничиваемой величины на одинаковый процент.

Пусть $a < x < b$. Подобное двустороннее ограничение необходимо разбить на два следующих образом:

$$x - a > 0; \quad b - x > 0$$

и проинформировать их:

$$\text{REST}(I) = \frac{x-a}{x} > 0, \quad \text{REST}(J) = \frac{b-x}{x} > 0.$$

Таким образом значения ограниченной будут меняться от 1 до 0 в допустимой области и от 0 до -1 (приближенно) в недопустимой. Основательно штрафная функция формируется так:

```
DO 400 IJ = 1, NC
400 CALL B4PEN (F, REST (IJ), FACTR),
```

где F — текущее значение целевой функции, инициирующее штрафную добавку в случае нарушения ограничений; $REST(IJ)$ — выражения для переменных, определяющие значения ограничений заданы; $FACTR$ — коэффициент штрафа K .

Идентификаторы F , $REST$ и $FACTR$ не зависят от типа задачи. Таким образом, в подпрограмме FUN должны обязательно стоять следующие операторы:

```
SUBROUTINE FUN (X, F, NV, REST, NC)
DIMENSION X(NV), REST (NC)
DIMENSION ..... (ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ)
COMMON (THREE) N, NFUNG, NDRV, IPR,
FACTR, IPRIN, FX, FY, ICONV, STERS, ACC
COMMON ..... (ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ)
DOUBLE PRECISION F
DO 500 I = 1, NV
500 X(I) = X(I) + XM (I)
```

Операторы, выводящие значение ЦФ и присваивающие их множителю F , в точке оптимальной области проектирования, задаваемых в виде равенств, — все эти операторы присваиваются в произвольном порядке элементам массива $REST$:

```
DO 400 I = 1, NC
400 CALL B4PEN (F, REST (I), FACTR)
DO 500 I = 1, NV
500 X(I) = X(I)/XM(I)
RETURN
END
```

Распечатка программы и решение тестовой задачи приведены в прилож. 1.

Поскольку в общем случае этот метод поиска приводит к локальному минимуму, необходимо процесс оптимизации провести несколько раз с различными начальными точками. Их количество должно превышать число независимых переменных не менее, чем в три раза. Координаты исходных точек выбираются внутри ограничений по принципу планирования эксперимента или по таблице последовательных чисел. Полученные в каждом задании значения ЦФ пользователь сравнивает и отбирает теоретически оптимальные.

В качестве теста решается задача „Размеры корпуса наибольшего объема“.

По чертею необходимо отформировать посылку прямоугольной формы при следующих требованиях. Длина ее не должна превышать 42 см, а сумми-

длины и параметра сечения, перпендикулярного к продольной оси, не более 72 см. Какими размерами посылки максимального объема?

Обозначим: X_1 — длина, X_2 — ширина, X_3 — высота корпуса, V — ее объем.

Целевая функция

$$V = X_1 X_2 X_3 + \max.$$

Ограничения

$$X_1 \leq 42, X_2 \leq 42, X_3 \leq 42,$$

$$X_1 + 2X_2 + 2X_3 \leq 72,$$

$$X_1 > 0, X_2 > 0, X_3 > 0.$$

Последние три условия накладываются на независимые переменные часто на физических соображений и задаются условием неотрицательности переменных.

Задача введена в подпрограмму FUN (см. с. 151). Результат на рисунке (см. с. 152): опробовано 9 сопряженных направлений, вычислено 263 оценки ЦФ (приводится текст распечатки только для одной исходной точки. Всего их было девять), объем посылки составляет 3456,5182 см³; $X_1 = 34$; $X_2 = 12$; $X_3 = 12$ см.

5.3.4. Пример оптимизации формы корпуса методом сопряженных направлений „Пауэлл“

Для судоустрого судна водоизмещением 25 000 т и скоростью 15 уз, требуется найти такие отношения соотношений главных размеров и поддольной части и коэффициента водозащитности, при которых минимизировались бы потребная мощность при ходе на регулярном волнении силой три балла. Будем рассматривать изменение ЦФ (мощности главного двигателя) над пространством проектирования, образуемое безразмерными характеристиками формы: удлинением L/B , отношением ширины к осадке B/T и коэффициентом полноты водоизмещения λ .

Пример носит чисто иллюстративный характер, и поэтому считаем, что диаграмма Пауэлла для определения бусинировочной мощности, формулы Карова для КИД винта и диаграмма Харвальда для коэффициента кавитации адекватны реальности¹⁰.

Учитываются также ограничения: а) длина между перпендикулярами не может быть менее величины $(2\sqrt{D+5})e^{0,333}$ по условиям приемлемой мореходности; б) осадка должна удерживаться в пределах от 0,035L до 12 м по условиям отсутствия сдвига и прохода в канал; в) при коэффициенте загрузки винта $\sigma_{\text{в}}$, большем 2,6, переходят к двухвинтовому судну для сохранения достаточно высокого КИД винта;

¹⁰Четко известно, что разным типам судов соответствуют различные оптимальные способы работы корпусов и эффективной мощности, поэтому введем для удобства поправки.

Имя параметра	Обозначение и расчетная формула	Расшифровка обозначения (показатель)
Исходные данные	$D = 25,000 r; r_e = 15,91; W = 56,480 \text{ м}^2$	MAIN: 0004; 0013
Полосность перемотки	$4 \leq \frac{L}{B} \leq 6,5; 2 \leq \frac{B}{Y} \leq 5; 0,5 \leq \beta \leq 0,95$	FUN: 0004
Наименее габаритная катушка	$k = (20,0/3 + 9) \cdot 10^3$	FUN: (6007-0011); 0013-0023
Масса статора	$12 > \frac{1,038 \cdot L \cdot B}{1056} > 0,035L$	FUN: 0021
Коэффициент острижки	$\psi_{\text{ост}} = \frac{L}{1056}$	FUN: (0022, 0023)
Длина статора	$L = 3 \sqrt{\frac{D}{1,038} \left(\frac{L \cdot Y}{B} \right) \frac{B}{Y}}$	LAPAP: 0005
Оптимальная скорость	$v = v_f \sqrt{\frac{v_{\text{ср}}}{L}}$	LAPAP: 0007
Коэффициент Паркса	$C_p = f(\phi, \beta, \lambda)$	LAPAP: 0004
Гидродинамический коэффициент статора	$[1 - \frac{D}{L} \cdot 14,7] \sqrt{f(1 + \delta)}$; $k = 0,05$ при двух катушках $w_1 = 0,210 + 1,358 \cdot \beta - 0,1 \cdot \frac{L}{B} \cdot \delta - 0,03 \cdot \frac{L}{B} + 0,01 \cdot \frac{L}{Y}$ при одной катушке $w_2 = 0,335w_1$ при двух катушках	LAPAP: 0008
Коэффициент потерь энергии при $d_1^* = 0,700$ и $d_2^* = 0,657$	$f_{\text{л}} = 0,25 \cdot 1,7^{\frac{L}{B}}$; $(0,134) \cdot (4,69 \frac{L}{B} - 6,238)$ при одной катушке $f_{\text{л}} = 0,8 \cdot (1 - 0,25w_1) w_2$ при двух катушках	LAPAP: 0010; 0034
Коэффициент лассиана		LAPAP: 0013; 0034

Коэффициент нагрузки катушки

$$\sigma_{\text{к}} = 2,6 \frac{f \cdot I_0}{(1 - w_1)^2 (1 - \epsilon)^2} \quad \text{при одной катушке}$$

$$\sigma_{\text{к}} = 1,2 \frac{f \cdot I_0}{(1 - w_1)^2 (1 - \epsilon)^2} \quad \text{при двух катушках}$$

$$\sigma_{\text{к}} = \frac{1,45}{1 + \sqrt{1 + \sigma_{\text{к}}}}$$

$$N_{\text{к}} = 0,738 \left[\frac{0,4}{1 + 4000 \cdot \text{exp}(-0,0001 \cdot D)} \right] \frac{320 \cdot (1 - w_1)^2}{14,6 \cdot \sigma_{\text{к}} \cdot (1 - \epsilon)}$$

$$\phi_{\text{к}} = (874 - 29035 + 31005^2 - 36466^2)^{0,5} / 57,3$$

$$\Delta N_{\text{к}} = 323 \cdot (1 - 0,05 \phi_{\text{к}}) \cdot B$$

$$N = N_{\text{к}} + \Delta N_{\text{к}}$$

$$B = \frac{N}{36400}$$

$$L = \frac{B}{\lambda} (\delta + 0,1)$$

$$P_{\text{эл.к}} = 32000 \frac{0,295 \cdot (0,7 - 0,036 \frac{L}{B})}{1,03 - 0,434 \ln(155 - S)}$$

$$\frac{L}{B} = \frac{B}{Y} \cdot \delta; \quad N; \quad P_{\text{эл.к}}$$

Высота на катушке

LAPAP: 0036

MAIN: 0003; 0045

* Если известны коэффициенты $\phi_{\text{к}} = \frac{N_{\text{к}}}{N}$ на катушке

$$\sigma_{\text{к}} = 0,8 - \frac{0,25}{\phi_{\text{к}}^2 + 0,1} \cdot \text{ctg} \phi_{\text{к}} = 1,19 \cdot (1 - w_1) \sqrt{\frac{v}{w_1}} \cdot \sqrt{\frac{13 - 337}{\phi_{\text{к}}}}$$

7) ограничение метода расчета буксировочной мощности по Памелти: удельные затраты не должны выходить за пределы 4–8,5, отношение ширины к осадке 2–5, коэффициент водоизмещения 0,5–0,95.

МММ в данном случае состоит из зависимостей, необходимых для определения потребной мощности главного двигателя при ходе на регулируемой высоте высотой 1,2 м, когда встречные волны еще не достигают посовой части валуны; для расчета дополнительного сопротивления на волнении использованы приближенные формулы Движдова. Последовательность расчета показана в табл. 8. Эта математическая модель соединена с оптимизационным блоком, использующим метод «Паузи/Уом, приложение 1). Полученная таким образом программа для решения поставленной задачи состоит из четырех подпрограмм.

1. MAIN – управленческая подпрограмма (см. с. 151). Обеспечивает ввод и вывод информации пользователю, осуществляет запуск математической модели судна (подпрограмму FUN) и блока оптимизации (подпрограмму C6PERB).

2. FUN – математическая модель судна (блок критерия эффективности и лексиконский блок). В данной задаче критерием эффективности является потребная мощность для хода на волнении. Программа работает с масштабированными независимыми переменными, осуществляет запуск расчетов мощности (подпрограмму L4PAR), штрафной функции (подпрограмму C6PEN), обеспечивает соблюдение ограничений на трехмерное пространство проектирования (C6PROV).

3. L4PAR – программа лексиконского блока (находит в подпрограмму FUN). Рассчитывает мощность по диаграмме Памелти, которая введена в виде двумерного массива, вычисляет дополнительную мощность из волнения и полную мощность ГД.

4. L4XY – стартовая подпрограмма интерполяции в двумерном массиве. Обеспечивает расчет коэффициента Памелти $e_{pa} = f(\sigma_2, \delta_{pa})$, который задан в массиве с шагом по относительной скорости $\Delta \delta^* = 0,1$ и коэффициенту остроты $\Delta \delta_{pa}^* = 0,1$.

В табл. 8 приводятся результаты оптимизации. Процесс начинается из 10 разных начальных точек. Дополнительным критерием служит масса металлического корпуса P_{mc} .

В какой мере можно доверять результатам машинной оптимизации? Ответ на этот вопрос можно получить лишь после анализа goodness оптимизации. Она зависит от ряда факторов. Основными из них – адекватность математической модели, приближенность исходных данных, ошибки вычислений.

5.4.1. Достоверность результатов

Адекватность модели, или соответствие рассчитываемых показателей основным свойствам судна как реального явления, зависит, в первую очередь, от полноты учета в ММС факторов, определяющих реальное поведение судна. Разумеется, учесть все факторы невозможно хотя бы потому, что не все они нам известны. Во-вторых, не всегда возможно формально описать взаимосвязи даже известных факторов. В-третьих, зарождение модели второстепенными малоизученными факторами может лишить ее работоспособности. Для определения достоверности модели при проектировании сложных сооружений не существует других реальных подходов за исключением априорной статистической оценки результатов расчетов по применяемым на практике образцам. Эта проверка тоже условна, поскольку нет оснований считать все существующие практические решения оптимальными. Поэтому более надежной является аналитическая проверка при моделировании отдельных свойств судна: заложенные в ММС алгоритмы расчетов главных элементов, мощности, загрузки и т. д. должны приводить к математическому описанию этих факторов на существующих судах при использовании эквивалентных исходных данных. Такой подход реализуем и модели затрат на строительство судов, рассмотренной нами в § 2.5: сопоставлялись оценки стоимости, полученные из модели, с фактическими затратами, которые имели место при постройке. Практическая модель затрат создана на основе дисперсионного анализа статистических данных по строительной стоимости готовых судов, сгруппированных по назначению, типу ЗУ, размерам (длина). В качестве инструмента аппроксимации чаще всего используют способы наименьших квадратов или наибольшего правдоподобия [18]. Весьма эффективен разработанный институтом кибернетики АН УССР способ аппроксимации характеристик сложных систем на основе самоорганизации моделей с использованием метода группового учета аргументов (МГУА). Он позволяет оптимизировать модель по адекватности, подбирая не только вид уравнений, регрессии, но и перечень наиболее существенных факторов для описываемого явления в условиях ограниченной информации.

Метод характеризуется большой трудоемкостью, но высокой результативностью. Его работоспособность подтверждается повторными открытиями известных физических законов на основе самоорганизации моделей соответствующих физических явлений [30].

Модели затрат на строительство судов, используемые в начальных стадиях проектирования, характеризуются среднестатистическими погрешностями* около 15%, что соответствует относительным ошибкам 45% при надежности 99,7% или 30% при надежности результата 95%. Ясно, что оценка стоимости судов в целях планирования при такой погрешности недопустима. Совсем другое дело — использование указанной модели для сопоставительной оценки вариантов решения, когда сравниваются математически ожидаемая стоимость. Погрешность математического ожидания статистической выборки на порядок ниже погрешности самих случайных величин. Возможные ошибки математического ожидания снижаются до 3% при надежности 0,95 и до 5% при надежности 0,997.

Погрешность исходных данных — другая причина недостоверности результатов оптимизации. При расчетах экономической ЦФ исходными данными служат основные элементы судов в различных условиях задачи. Ошибки в определении элементов и характеристик судов (водоизмещение, мощность ЦВ, скорость, грузоподъемность и т. д.) зависят от детальности проектных проработок. В техническом проекте возможные ошибки в определении элементов с максимальной оценкой 99% не превосходят одного процента [30], на стадии технического предложения они могут возрасти до 8%, при этом надежность оценок снижается до 0,90. При определении характеристик исходных условий приходится пользоваться категориями прогнозирования, для которых величина возможных погрешностей значительно больше, а иногда вообще не поддается подсчету. Возможные относительные ошибки в оценке прогнозируемого явления складываются из двух компонентов: $\epsilon = \epsilon_1(H) + \rho(t)\epsilon_2(H)$, где $\epsilon_1(H)$ — относительная ошибка, обусловленная недостаточной полнотой учета факторов, определяющих прогноз. Эта ошибка может быть сведена к минимуму специальными методами, в частности МГУА, поэтому она является устраняемой ошибкой; $\epsilon_2(H)$ — ошибка, связанная с вероятной природой прогнозируемого феномена (внезапная ошибка); $\rho(t)$ — коэффициент изменения ошибки с увеличением горизонта (глубины ретроспекции и перспектив прогноза); H — надежность оценки (ее достоверность вероятность).

Устраняемая относительная ошибка уменьшается с увеличением объема используемой информации об изучаемом явлении. Ее нормальная величина 10–15%. Использование метода самоорганизации модели про-

гноза по МГУА может повлиять на ошибку прогноза до 5% при надежности 0,95.

Устраняемая относительная ошибка зависит от разброса характеристик феномена относительно среднего значения и ретроспективный период. Коэффициент усиления этой ошибки при удалении срока прогноза и в глубины ретроспекции определяется по формуле

$$\rho(t) = \sqrt{1 + \frac{1}{T_0} + \frac{(2t + T_0 - 1)^2}{T_0^2 - 1}}$$

где t — срок (перспектива) прогнозирования; T_0 — глубина ретроспекции, т. е. длина анализируемого временного ряда.

Видно, что удаление перспектив прогноза существенно увеличивает неизбежную ошибку, а то время как увеличение глубины временного анализа слабо помогает делу. Достоверность прогнозов при оценке эффективности судов невысока — относительные ошибки могут составлять от нескольких десятков до сотни процентов (рис. 27). Такое неблагоприятное положение с экономической оценкой является причиной непрекращающихся попыток разработки неэкономических критериев оптимальности, связанных с натуральными показателями судна [6, 32].

Каждое оптимальное решение проверяется на устойчивость при возможных изменениях внешней ситуации в экономической области (изменение цен, строительно-монтажных затрат и т. д.). Только по результатам такой проверки можно судить о применимости полученных оптимальных результатов.

Ошибки очислений — третья причина недостоверности оптимизации. Они накапливаются в ходе многоэтапных расчетов ММС и могут составить значительную величину. Эти ошибки обусловлены погрешностями округления, усечения и физическими ошибками, связанными с неадекватностью математических расчетов, неадекватностью отношением к работе, неадекватностью ЭВМ и т. д. Погрешности первых двух видов определяются по правилам теории ошибок и могут быть сведены к

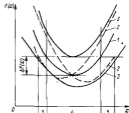


Рис. 27. Влияние недостоверности прогнозируемых затрат на положение оптимального ЦФ.

1 — математическое ожидание ЦФ; 2 — возможная величина ЦФ при различных исходных данных; 3 — отклонения наибольших оптимизаций; 4 — критерия или оптимальности внешней среды; 5 — срок оптимальной точки; $\Delta(t)$ — величина погрешности ЦФ в зоне экстремума

*Эта выборка, состоящая из n точек $(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})$, характеризует объект феномена, определяемый m факторами, среднестатистическая ошибка априорной оценки составляет

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}{(n-1) - m}}$$

где i — номер фактора от 1 до m ; n — объем выборки должен быть таким, чтобы $n > 4m + 30$.

минимуму за счет увеличения точности записи цифр. Правда, в этом нет необходимости, поскольку ошибки из-за неадекватности модели и неадекватности исходных данных на несколько порядков превышают погрешность из-за усечения и округления данных.

Фигурные ошибки могут самым неверным образом искажать результаты. Поэтому весь процесс вычислений при отладке программ целесообразно проводить поэтапно с обязательным анализом промежуточных результатов исполнителем расчетов. Кажущаяся при этом увеличение трудоемкости расчетов на самом деле оборачивается большой экономией труда и времени, исключает длительный поиск возможных ошибок и часто ненужное повторение всего цикла работ.

Общая относительная ошибка оптимизации ϵ_{opt} является результатом взаимодействия ошибок адекватности ϵ_a , исходных данных ϵ_d , расчета ϵ_r как трех независимых случайных компонентов вычислений:

$$\epsilon_{opt} = \sqrt{\frac{\epsilon_a^2 + \epsilon_d^2 + \epsilon_r^2}{3}}$$

откуда очевидно, что даже при самой тщательной подготовке ММПС невозможно получить погрешность менее 5%. Практически погрешность оптимизации складывается в пределах 5–15%.

5.4.2. Устойчивость решения, чувствительность

Устойчивостью оптимума называется свойство экстремума (истинного или условного) ЦФ оставаться над определенной узкой областью независимых переменных при изменениях либо заданных величин, либо параметров, либо нормативов задачи.

Различают абсолютную и относительную устойчивость оптимального решения. На рис. 28 приведен график изменения одномерной ЦФ $\Phi(x)$, в которой x — независимая переменная, L — заданная величина, принимающая ряд значений L_1, L_2, \dots, L_n . На рис. 28, а представлена устойчивая целевая функция: с изменением L растет значение ЦФ, но значение x_{opt} не меняется. На рис. 28, б выборки — решение неустойчиво: с изменением L монотонно меняется величина ЦФ и меняется положение x_{opt} . Особенно неблагоприятны для поиска оптимума некоррктность задачи или абсолютная неустойчивость решения, когда весьма малым изменением исходных данных соответствуют сильно различающиеся оптимальные векторы при почти одинаковых значениях ЦФ. Наконец, рисунок 28, в иллюстрирует относительную устойчивость решения: изменение целевой функции и оптимального значения независимой переменной монотонно, можно проследить закономерность их перемещения с ростом параметра L . С этим видом устойчивости чаще всего приходится иметь дело при оптимизации. В таком случае закон изменения $x(L)$ может быть установлен на основании систематизированного модельного эксперимента. Он используется в дальнейшем для принятия решений.

При неустойчивом оптимуме проектант обязан переходить к другой форме критерия оптимальности или видоизменить алгоритм

математической модели до тех пор, пока не добьются устойчивости.

Чувствительность характеризует направление и скорость изменения характеристик объекта при смещении исходных переменных относительно своего оптимального положения.

Формальное определение чувствительности соответствует выражению

$$\epsilon f_{x_i}^{\gamma} = \frac{\partial(\ln \gamma)}{\partial(\ln x_i)} = \frac{x_i}{\gamma} \frac{\partial \gamma}{\partial x_i}, \quad (4.1)$$

где γ — выходная характеристика объекта (например, стоимость, показатель некоторого свойства объекта и т. д.); x_i — варьируемые элементы объекта; $\epsilon f_{x_i}^{\gamma}$ — эластичность γ по x_i .

В качестве γ могут рассматриваться и оптимизируемые переменные, а роль x_i играть исходные данные, параметры или нормативы.

Частную производную $\partial \gamma / \partial x_i$ называют функцией чувствительности, или коэффициентом влияния переменных x_i на выходную характеристику системы γ . Выражение (4.1) является коэффициентом эластичности или просто эластичностью γ по x_i . Эластичность тоже характеризует чувствительность функции γ к аргументу x_i и используется в оптимизации для оценки чувствительности ЦФ к независимым переменным. Если при малых изменениях исходных переменных колебания значений ЦФ не

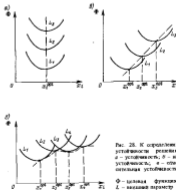


Рис. 28. К определению устойчивости решения: а — устойчивость; б — неустойчивость; в — относительная устойчивость;

Φ — целевая функция; L — изменяя параметр

превращает погрешности ее расчета, то данные независимые переменные следует исключать из числа оптимизируемых величин, в противном случае их целесообразно оставить для оптимизации.

Хотя и необходимо знать, как зависит функция цели и ограничения от простых переменных, этого недостаточно для сложных систем проектирования. Более полную информацию для проектировщика может составить производная ЦФ при независимых изменениях в системе ограничений:

$$e_i^T \dot{\psi}_i dx_i < \Delta \dot{\psi}_i,$$

где $\dot{\psi}_i$ — вектор ограничений, которые выполняются вблизи своих критических значений или нарушаются; при этом относительное изменение $\dot{\psi}$ должно быть ограничено величиной $\Delta \dot{\psi}$; x_i — i -я компонента независимых переменных.

Когда в некоторых вариантах решений ограничения превосходят допустимые пределы, представляется интерес отыскание оптимального решения, которое не выводит отклонения ограничений за пределы $\Delta \dot{\psi}$. Вполне возможно, что это небольшое отклонение в ограничениях даст заметное улучшение целевой функции. Именно с этим аспектом исследования чувствительности тесно связано определение маргинальных производных (см. § 2.6), т. е. коэффициентов приращения целевой функции F при смещении ограничений k :

$$\frac{\partial F}{\partial b} db = \frac{\partial x_j}{\partial b_j} \frac{\partial F}{\partial x_j} dx_j.$$

Другая важная область использования выражения (4.1) — исследование эластичности замены факторов j и k :

$$\frac{dk/k}{\frac{\partial F/\partial k}{\partial F/\partial j}} = \frac{e_k e}{\frac{\partial F}{\partial j}},$$

где e означает относительный дифференциал.

При экспериментировании с МНС на ЭВМ определение указанных производных проводится численными методами на основе параметрического анализа или многократной оптимизации при систематически изменяемых входных данных (заданных величин, параметров, характеристик) и ограничительной задаче.

Знание эластичности ЦФ позволяет просто определить диапазон рациональных значений независимых переменных из соотношения

$$e x_j = \frac{eF}{e_i^T x_i},$$

где eF — погрешность определения ЦФ; $e_i^T x_i$ — ее эластичность

Таблица 3. Результаты оптимизации параметров формы гребня по максимальной мощности

Номер исходной точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Координаты исходных точек:										
b	0,650	0,734	0,670	0,700	0,800	0,650	0,550	0,650	0,550	0,550
L/B	5,0	9,0	5,0	6,0	8,0	10,0	2,5	5,0	10,0	10,0
B/T	3,0	5,0	2,5	3,0	4,0	5,0	1,0	2,5	5,0	2,5
Начальное значение целевой функции $M_{\text{греб}}$	9338	7151	10212	8400	7462	8259	8014	18360	8307	7576
Коэффициент оптимального максимума:										
$\dot{\psi}$	0,347	0,532	0,370	0,370	0,339	0,331	0,259	0,580	0,340	0,269
L/B	6,8	6,9	7,1	7,3	7,0	6,6	7,0	7,2	6,7	7,1
B/T	4,2	4,1	4,0	4,0	4,1	4,3	4,1	4,0	4,2	4,0
Значение целевой функции $M_{\text{греб}}$, кВт	3552	5554	5338	5339	5236	3601	5359	5889	5366	5686
Масса корпуса $P_{\text{м.к}}$, кг	6341	6335	6246	6233	6319	6409	6412	6535	6535	6534
Масса профилей $P_{\text{м.п}}$, кг	12	5	11	27	12	12	12	21	6	7
Количество ступеней ЦФ от начальной до оптимальной точки	154	112	246	543	258	300	339	252	212	181

Примечание. Коэффициент оптимального максимума выбраны по правилу минимизации отклонения. Здесь — оптимальное значение.

по независимому переменному δ ; $\delta_{\text{опт}}$ — диапазон оптимальности переменного δ с центром $\delta^{\text{опт}}$.

Таким образом, если погрешность расчета целевой функции составляет 10%, а эластичность равно 0,8, то рациональные (лежащие в окрестности теоретического оптимума) значения соответствующих переменных изменятся от 0,673 $\delta_{\text{опт}}$ до 1,125 $\delta_{\text{опт}}$. Это значит, что в диапазоне с коэффициентом обшей полноты (табл. 9) все значения δ от 0,500 до 0,640 равноправны в смысле минимума мощности. Значение диапазона рациональных значений позволяет выбрать то, которое удовлетворяет дополнительным критериям в данной задаче. Например, учитывая высокую технологичность более полого корпуса, следует выбрать коэффициент обшей полноты равным 0,640, а не 0,570, как это показывает точка теоретического оптимума.

Проверка чувствительности может быть выполнена в параметрической форме, когда один из независимых переменных систематически меняет свое значение, тогда как остальные остаются постоянными, либо в форме оптимизации. В последнем случае одну из независимых переменных вводят в качестве параметра в состав заданных величин и придают ей ряд значений, одновременно оптимизируя остальные независимые переменные.

В приводимом примере (см. проток, 3) проверяется влияние δ на целевую функцию $N_{\text{д}}$. Для этого в программе „Проверка чувствительности по δ “ введены по сравнению с программой „Оптимизация параметров формы корпуса“ только один новый оператор под номером 0020:

0020 READ J, DELTA,

который выводит δ на цикл. Поэтому общее число операторов по сравнению с программой „Оптимизация параметров формы корпуса“ (см. с. 151) стало на единицу больше, соответственно на 1 возросли все номера операторов после 0019 (т. е. 0020 стал 0021 и т. д.). Кроме того, изменились операторы 0010 (теперь 3 заданных значения вместо двух) и 0026 (2 независимых переменных вместо 3). В табл. 10 приведен результат проверки чувствительности мощности при ходе на результате трехбальным корпусом. Настройка к мощности определялась по формуле Дювильона. Во второй строке таблицы приведены значения ЦФ, соответствующей разным δ при $L/B = 7,0$ и $B/T = 4,1$, а в строку ниже даны отрицательные значения L/B и B/T и минимальная мощность. Эти цифры, воспроизведенные на рис. 29, свидетельствуют о допустимости использования принципа суперпозиции для оценки чувствительности вместо повторной оптимизации: характер зависимости мощности от δ идентичен в обоих случаях. Почти одинаков и диапазон оптимальных значений, найденный по результату проверки чувствительности. Показано, что возможная ошибка определения мощности составляет 10%, по рис. 29, а выходя зона оптимальных значений δ от 0,50 до 0,68. Примерно то же значение эластичности ЦФ по коэффициенту обшей полноты, равная 1,325 (рис. 29, б). Последняя цифра свидетельствует о высокой чувствительности потребной мощности к коэффициенту полноты судна. Этот коэффициент (или связанный с ним коэффи-

Таблица 10. Результаты проверки чувствительности ЦФ к δ (при $L/B = 7,0$; $B/T = 4,1$)

Значения δ	Наилучшее значение ЦФ $N_{\text{д}}$									
	0,500	0,510	0,520	0,530	0,540	0,550	0,560	0,570	0,580	0,590
Оптимальная точка для данного δ										
L/B	6,259	6,870	7,440	8,020	8,650	9,300	9,950	10,600	11,250	11,900
B/T	4,570	4,150	3,840	3,560	3,310	3,130	3,000	2,900	2,800	2,740
Значение ЦФ $N_{\text{д}}$	5781	5547	5371	5212	5071	4962	4862	4766	4684	4614
Место профилей спроектированных парализаций	21	6	5	8	6	8	8	13	7	6
Количество точек ЦФ от минимальной точки до оптимальной	257	108	104	145	110	142	243	152	261	104
Масса металла высшего корпуса $P_{\text{вх}}$	6563	6422	6704	6492	6496	6491	6391	6447	6389	6418
Относительная ошибка	-0,33	-0,27	-0,20	-0,14	-0,07	0	0,07	0,14	0,20	0,27
$\delta \delta_{\text{опт}}$	-0,17	-0,19	-0,18	-0,15	-0,06	0	0,09	0,17	0,21	0,18

ний продольной кривой ψ) следует обязательно включить в список независимых переменных при оптимизации формы судна?

Подобным образом проверяется чувствительность ЦФ к остальным независимым переменным и устанавливаются их зоны оптимальности.

Можно ли распространить полученные выводы об оптимальности L/B и B/T на подобные суда другого водоизмещения? Ответ на этот вопрос может дать проверка устойчивости оптимума. Для этого следует просчитать всю задачу при нескольких систематически изменяющихся значениях водоизмещения, а затем и по скорости, если нас интересует устойчивость решения по v_p . В прилож. 4 приведена программа проверки устойчивости решения по водоизмещению. По сравнению с программой „Оптимизация параметров формы корпуса“ (см. с. 151) введен еще один новый оператор 0020 READ 2, D, выводящий водоизмещение на цикл, а также изменен оператор 0014 (он оставляет неизменной только скорость v_p). На с. 149 дана распечатка результатов для одного цикла проверки устойчивости при $D = 31000$. Полностью результаты проверки устойчивости приводятся на рис. 30. Неустойчивость по δ и L/B при вариациях водоизмещения должны вызывать беспокойство. Но монотонное изменение критерия эффективности N и абсолютная устойчивость коэффициента острогости по Папаяно $\psi_n = 106B/L$ свидетельствуют о допустимости использования принятой модели судна для целей оптимизации формы.

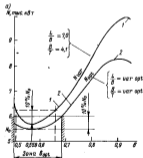


Рис. 29. Оценка устойчивости и чувствительности N по δ : а — проверка устойчивости методом квадратичной (1) и полной оптимизацией с увеличением числа независимых переменных (2); б — чувствительность модели по коэффициенту острогости

* Расчётный шаг можно усложнить в целях обеспечения меньшей оптимальности. Учёт условий остойчивости, непотопляемости, дифферентности, наклона в большей степени связан с параметрами формы судна, правей бы к другому центру независимых переменных.

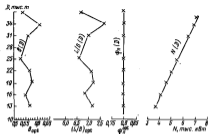


Рис. 30. Оценка устойчивости оптимума независимых переменных по водоизмещению в задаче „Оптимизация формы корпуса“

Если все же результаты оптимизации нас не удовлетворяют из-за неустойчивости решения, то необходимо изменить модель (применить иные способы расчета ходкости), а возможно, и использовать новый тип критерия оптимальности. Уточнение математической модели идет по пути более полного описания свойств судна и процесса его эксплуатации. Поэтому каждому типу судна предостается специализированная модель, использующая методы расчетов ходкости, прочности, вместимости, масс и т. д., учитывающие особенности данного типа. С этой точки зрения вполне оправдана разработка индивидуальных математических моделей для разных типов судов [11, 25, 32, 40, 42, 47, 48, 53]. Одним из наиболее надежных путей повышения точности расчета сложных систем является разделение их на большее число отдельных составляющих с разработкой собственных расчетных алгоритмов для каждой из них*. Примером такого подхода может служить алгоритм расчета массы корабельного судогрузного судна [1, 42]. Степень детализации модели должна соответствовать стадии разработки проекта. При решении жизненной задачи проектирования, когда входные параметры заданы весьма приближенно, использование сложной модели неэффективно, так как в сочетании с развитыми моделями

*Вероятные относительные ошибки суммы и слагаемых, среднеквадратичные значения на результат, определяются формулой [10]

$$\sigma_n = \frac{\sigma}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 / \sigma^2}$$

где σ_i — доля i -го слагаемого в сумме; σ_i — его относительная погрешность. Поэтому разброс суммы на большее число слагаемых даже при дрейфе их погрешности идет к снижению относительной погрешности суммы.

прочности и общими нормативными требованиями записи о поперечном сечении может стать непостоянной для серийной ЭВМ и, следовательно, потребуются особые технические условия для ее реализации. На стадии разработки технического предложения при решении внутренней задачи верхнего уровня также возможно применение конструкторской модели, оперирующей интегральными характеристиками судна: это оправдывается низкой стоимостью расчета приведенных затрат (она в несколько раз ниже точности определения элементов нагрузки судна).

Самое важное, однако, заключается в том, что все расчеты по оптимизации в конечном счете направлены не на получение абсолютных цифр (которые всегда не будут соответствовать конкретным условиям строительства и эксплуатации), а на поиск закономерности изменения эффективности и специфических свойств судна, интересующих заказчика, при изменении составной основной элементной характеристики судна. Если оптимум по такому показателю не устойчив, то именно глубже проанализировать алгоритм расчета расходов по судну для выявления возможных несоответствия аппроксимации существу явления в каком-то элементе расчета. Стоимость показателя рассчитывается по весьма приближенным зависимостям, к тому же они имеют конструкторский характер, существенно зависят от местных условий, правильности определения ил. Поэтому неустойчивость оптимума при колебаниях значений параметров стимулирует использование квантитативности (натуральных или безразмерных) показателей.

Как должны соотноситься оптимальные результаты с элементами того же судна, подсчитанными по традиционным формулам? Практика использования оптимизационных показателей, что для судов традиционного типа цифровые должны быть близки.

В качестве иллюстрации рассмотрим вычислений П. Колевым [23] пример оптимизации элементов навалочного судна с традиционной для 70-х гг. архитектурой, осадкой до 10 м и водоизмещением около 58 000 т. Масса корпуса рассчитывается по формуле Норвежского бюро Веритас, остальные составные нагрузки — по формулам, подобным [1], ходовые расходы — по методике Салвардифа-Дэусона, приведенные затраты — в соответствии с методикой ЦНИИМФ [24]. Оптимизационные значения независимых переменных, найденные способом Розенброка [51], таковы: $L/B = 6,158$, $B/T = 3,3$, $\delta = 0,831$, $v_0 = 12,62$ уз, что соответствует длине 204 м при числе Фруда 0,145.

Статистическая формула длины $(2\sqrt{D} + 5)\sqrt{v_0}$ дает 191,5 м, что при указанной скорости соответствует числу Фруда, равному 0,150. Составим коэффициенты общей погрешности, получаемые по статистическим формулам и в результате оптимизации, получаем:

$$\begin{aligned} 1,05 - 1,4Fr \pm 0,06, \dots \dots \dots 0,840 \pm 0,06 \text{ (В. В. Ашкс)} \\ (0,645 \pm 0,01)Fr^{-1/3}, \dots \dots \dots 0,837 \pm 0,02 \text{ (В. В. Ашкс)} \\ 1,09 - 1,68Fr \pm 0,05, \dots \dots \dots 0,838 \pm 0,05 \text{ (Л. М. Ногин)} \\ 0,86 - 0,28Fr \pm 0,03 (Fr + \end{aligned}$$

$$+ 0,6) \left(\frac{L}{B} - 5 \right) \pm 0,05, \dots \dots \dots 0,864 \pm 0,05 \text{ (автор)}$$

$$1 - 1,25 \left(\frac{B}{L} + 1 \right) Fr, \dots \dots \dots 0,782 \pm 0,03 \text{ (Талларфур)}$$

$$1 - \frac{0,50}{1 + 100 \exp(-22Fr)} \dots \dots \dots 0,893 \pm 0,01 \text{ (автор)}$$

$$\delta_{opt} \text{ по методу Розенброка} \dots \dots \dots 0,831 \pm 0,10 \text{ (П. Н. Колев)}$$

На рис. 31 приведены результаты проверки устойчивости оптимального востора ($L/B = 6,158$, $B/T = 3,3$, $\delta = 0,831$, $v_0 = 12,62$) при изменении цен на сталь и оборудование. Заметна слабая устойчивость $(L/B)_{opt}$ и δ_{opt} , но монотонное изменение ЦФ и абсолютная устойчивость интегрального параметра формы $\psi_{opt} = 106B/L$ позволяют использовать результат для выбора элементов судна. П. Колев ничего не говорит о чувствительности ЦФ

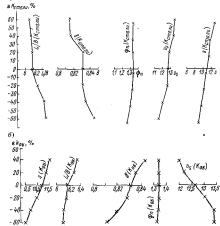


Рис. 31. Проверка устойчивости оптимальных элементов навалочного судна водоизмещением 58 000 т при изменении цен на сталь (а) и оборудование (б).

L/B — удлинение востора; δ — коэффициент вынута водоизмещения; v_0 — скорость судна; ψ — приведенные затраты оптимального судна.

к независимым переменным и о достоверности полученного решения. Но использование им более разноразличных, чем в [24], формул ЦНИИМФ свидетельствует о том, что точность расчета не выше осторожной: в § 2.4, поэтому можно принять доверительный интервал ЦФ равным $\pm 10\%$ и эмпирею ее по δ 1,1. Даже такая сравнительно высокая точность позволяет считать оптимальными все δ от 0,75 до 0,90. Подобная картина наблюдается при рассмотрении диапазона оптимальности остальных независимых переменных. Систематическое использование оптимизационных программ показывает, что они не дают качественно новых решений для традиционных типов судов. Это дает основание считать рекомендацию теории проектирования для новых судов оптимизированными длительной практикой судостроения. И наоборот, оптимизационные методы играют важную роль в оценке тенденций изменения характеристик судов при появлении особых видов условий или ограничений, а также при создании совершенно новых типов судов.

Исключительное значение имеет проверка устойчивости решения, она должна производиться по всем параметрам и нормативам, используемым в математической модели. Эта проверка позволяет ответить на ряд важных вопросов, в частности:

а) в пределах каких изменений исходных данных полученное оптимальное решение практически не меняет своего значения?

б) какое влияние оказывают существующие тенденции в изменении строительных и эксплуатационных расходов на оптимальные характеристики судов? (Отвечая на этот вопрос, можно прогнозировать тенденции изменения основных элементов новых судов);

в) как зависит оптимальное решение от выбора того или иного критерия оптимальности?

Ответы на эти вопросы порою важнее определенных самих оптимальных значений независимых переменных.

**ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АППАРАТА
ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДНА**

§ 5.1. Пример оптимизации элементов каютного судна

Пусть требуется обосновать характеристики и размеры каютного судна, призванного обеспечить известной объем перевозок на конкретной линии эксплуатации [47]. В число заданных величин входят: объем грузовых перевозок на линии Q^z , протяженность линейного рейса L , тип энергетической установки $J_{2,2P}$, параметры волнения, при которых должно обеспечиваться нормальное эксплуатация судна. Среди нормальных данных находятся геометрические характеристики грузовых единиц, законы их между собой и выбором судна; нормы грузовых работ в функции грузоподъемности; эксплуатационный период судна в функции нагрузки; нормы времени стоянок вне грузовых операций $t_{c,0}^z$; все измерительные строительной стоимости и эксплуатационных расходов судна, определенное мезодской заказчик [24]. Параметрами задачи являются грузоподъемность P_z и число судов на линии N_z , а также скорость судна, определенная в функции P_z и N_z , измерительные в уравнениях теории проектирования, стоимость груза. Критерием оптимальности служат удаленные приведенные затраты e^z по всей группе судов N_z , обеспечивающих выполнение поставленной транспортной задачи:

$$e^z = \left[\frac{E + k\delta + E_{св,ср}^z}{Q} \right] N_z,$$

где $N_z = Q^z/Q$.

Система ограничений включает: ограничение осадки ($T \leq T_0$), ширины ($B \leq B_0$) по эксплуатационным и производственным условиям; ограничения параметров режима ходкости, обусловленные принятым методом расчета (используется способ Коллтропа, обеспечивающий наиболее широкий диапазон варьирования параметров ходкости); функциональные ограничения, позволяющие обеспечить необходимый уровень качества проектируемого судна. В частности, такими ограничениями служат следующие.

Пределы изменения максимальной метacentрической высоты проектируемого судна $B_{z,0} \leq h \leq h_{z,0}^*$, где $B_{z,0}$ — начальная метacentрическая высота судна, увеличивающая потерю устойчивости при затоплении симметричного отсека в средней части судна и необходимый остаток для сохранения прямого положения судна после аварии, $h_{z,0}^*$ — критическое значение метacentрической высоты, при котором еще сохраняется плавная катя судна.

Определенный запас плавучести κ , обеспечивающий сохранение на плаву судна с заданными элементами при затоплении среднего отсека относительной длиной

$$\beta_s = \frac{\left(\frac{H}{T} - 1\right) k_0 a - \beta b}{\left(\frac{H}{T} - 1\right) + \beta k_{\omega} \mu_0}$$

где H/T — относительная высота борта по условию вместимости судна; k_0 — коэффициент развала бортов в подводной части судна; a, b, β — коэффициенты полноты судна; k_{ω}, μ_0 — редукционный коэффициент площади мидель-шпангоута и коэффициент проницаемости затопляемого отсека.

Полное соответствие объема в основном корпусе и площади палуб размещаемой над части чистого груза (условия вместимости по объемам и площади).

Определение грузоподъемности вариантов совместно с расчетом массы балласта

$$P_T = k_0 \beta L B T - \sum_1^m P_{T_i}$$

где в P_T включается масса балласта, необходимого для обеспечения положительной начальной остойчивости при заданной схеме размещения груза по палубам. При этом масса балласта определяется как

$$P_0 = \frac{\sum_1^{m-2} P_{T_i} \zeta_{g_i} + P_{T_{i-1}}^m \zeta_{g_{i-1}} + P_{T_{i+1}}^m \zeta_{g_{i+1}} - \zeta_g (D_{\text{осв}} + P_T)}{\zeta_g - \zeta_{g_0}}$$

где $\sum P_{T_i} \zeta_{g_i}$ — сумма статических моментов масс судна без балласта и чистого груза; $\zeta_{g_i} = \frac{P_{T_i}}{V_{T_i}} \cdot \zeta_{g_0} \cdot \frac{P_{T_i}}{V_{T_i}}$ — относительные аппликации центра тяжести судна, груза на верхней палубе, балласта, груза в основном корпусе. Связи нагрузки определяют по формулам гл. 2.

Оптимизация проводится методом ДСК — „Лауриц“, описанным в п. 3. Задача может решаться в разных модификациях в зависимости от типа применяемых независимых переменных. Будем решать задачу смешанного типа (содержащую элементы внешней и внутренней заданной проекции) — описание оптимального сочетания двух характеристик (P_T и ν_T) и четырех элементов судна (L, B, T, δ) для судна, участвующего в группе численностью N_s (примем от 4 до 11 судов), которая обеспечивает годовой грузооборот $Q^L = 750\,000$ т на линии протяженностью $L = 16\,000$ миль.

Грузоподъемность P_T и число судов N_s будем рассматривать как параметры, причем N_s может быть только целым. С этими параметрами связана скорость:

$$N_s = Q^L / Q; C = \frac{2P_T \nu_{\text{ср}} T_s}{L} + \frac{4P_{\text{ср}} \nu_{\text{ср}}}{M} + C_1'$$

где Q — годовая провозоспособность судна; $\nu_{\text{ср}}$ — коэффициент использования грузоподъемности; k_p — коэффициент потерь скорости при маневровых; C_1' — время стоянок вне грузовых операций, T_s — эксплуатационный период судна; M — норма грузовых работ, $\nu_{\text{ср}}$ и, следовательно,

$$\nu_T = \frac{Q^L L}{\left[2T_s P_T \nu_{\text{ср}} N_s - Q^L \left(\frac{4P_{\text{ср}} \nu_{\text{ср}} T_s}{M} + C_1' \right) \right]} 24k_p$$

Теперь есть возможность построения кривых $\nu_T = f(P_T, N_s = \text{const})$. На каждой из этих кривых (рис. 32) в нескольких точках a, b, c, k, d, q при заданных P_T и ν_T способом ДСК — „Лауриц“ определяем оптимальные независимые переменные L, B, T, δ и вычисляем соответствующие им минимальные значения приведенных затрат $e_{\text{пр}}^L$, которые наносит на крайнюю восточную часть судна. Получим таким образом „дуги“ приведенной стоимости перевозок — кривые $\nu = f(P_T, N_s = \text{const})$ со значениями приведенных затрат $e_{\text{пр}}^L$ в точках a, b, c, k, d, q . Теперь рассмотрим все после этих точек, легко построить кривые приведенных затрат и отложить на них точки m_0 с минимальным значением $e_{\text{пр}}^L$. Соединив все восемь (по числу кривых $N_s = \text{const}$) таких точек, получим возможность определения оптимальных элементов (точке соответствует набор главных размеров), грузоподъемности и скорости проектируемого судна при фиксированном числе судов N_s , дальности плавания L , типе ΣV и объеме годовых перевозок на линии Q^L . Все указанные построения проводятся на экране пиктера или вычерчиваются на бумаге с помощью

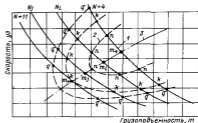


Рис. 32. Построение „дуг“ и значений приведенных затрат. 1 — „дуги“; 2 — значения $e_{\text{пр}}^L$; 3 — минимального эксплуатационного затрат оптимального судна

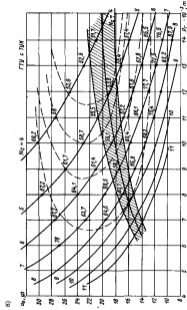
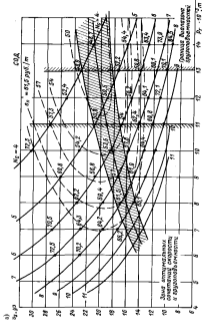


Рис. 33. Скорость движения шестерни в функции диаметра шестерни и в количестве шестерен на валу при $\Phi = 150000$ и $L = 16000$ мм: а - срабатывающие режимы; б - допустимые условия с технологическими потерями.

графопроектировщика. Полученные таким образом рисунки для судов с двумя типами ЭУ (СОД и ГТУ) приведены на рис. 33, а, б. Полученные максимумы легко интерпретировать в зависимости $x^2 = f(P, N = \text{const})$, показанную на рис. 34, которая позволяет оценить критические значения грузоподъемности прекаргоуемого судна для заданных Q^2 , L , J_{3y} и N_C ; и, наоборот, по рис. 34 можно судить, что оптимальная в заданных условиях ($Q^2 = 750\text{--}900$ т, $L = 16\text{--}2000$ мкм, $J_{3y} = \text{СОД}$) грузоподъемность легкого коле 14000 т, а критические ее значения (выше которых начинается быстрый рост приведенных затрат) находятся в районе 11–12 тыс. т. Увеличение грузоподъемности свыше 14 тыс. т в силу масштабного эффекта сооружения не должно ухудшать экономические показатели судна, но намереваясь изложить на ограничение по партию груза. При значительном росте партии груза (например, при перевозках лагерьного леса и шлама) грузоподъемность современного легкого судна может значительно возрасти и достичь 50000 т.

5.5.2. Оптимизация характеристик и элементов контейнерова методом дискретно-непрерывного или смешанного программирования

При неограниченном объеме перевозок Q , дальности плавания $L = 10\text{--}1000$ миль и средней массе грузного контейнера $q_k = 12$ т, требуется оптимизировать характеристики (контейнероёмкость N_C и

скорость v_d) и главные элементы (L , B , H , δ) контейнерова, соблюдая следующие ограничения: $0,55 < \delta < 0,8$; $5 < \frac{L}{B} < 8$; $15 < v_d < 34,8$; $T < 11$ м; $B < 32,3$; $K_{\text{стаб}} \geq 1$; $\theta_{\text{max}} > 60^\circ$; $I_{\text{стаб}} \geq 0,2$ м; $\theta_{\text{стаб}} > 30^\circ$; $0,31 < \delta < K_{\text{стаб}}$, где $K_{\text{стаб}}$ — критерий погоды для контейнерова по правилам Регистра; $\theta_{\text{стаб}}$ — угол наклона диаграммы статической устойчивости; $I_{\text{стаб}}$, $\theta_{\text{стаб}}$ — максимальное плечо и соответствующий ему угол крена на диаграмме статической устойчивости; $H_{\text{стаб}}$ — верхняя граница метацентрической высоты грузного контейнерова по условиям плавной качки.

Независимые переменные L , B и H дискретны. Принимаются также их значения, которые с заданной относительной погрешностью (в данной задаче 1,0,01) обеспечивают такое число контейнеров по длине, ширине и высоте трюма. Применительно к контейнеровам задача оптимизации имеет следующий вид: минимизировать приведенные затраты $F(x)$, $x \in E^n$ при ограничениях $g_j(x) \geq 0$, $j \in R$ и при условии $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} = \{x^d, x^c\}$, где $F(x) = \text{const}$; $i \in R$ — множество индексов значений; n — число независимых переменных включая задан; $x^d \in R^d$ — допустимое подмножество дискретных переменных (длина L , ширина B , высота борта H); $x^c \in R^c$ — допустимое подмножество непрерывных переменных (осадка T , коэффициент водоизмещения δ , скорость v_d).

Одно из подмножеств может быть пустым. Оптимум задачи находит минимизирующей функции (3.10). Коэффициенты r_k , S_k и β_k оказывают большое влияние на функцию $F(x)$. Неудачный выбор одного из них способен повлечь непокупные затраты машинного времени. По опыту эксплуатации алгоритма можно рекомендовать такие значения коэффициентов: $r_k = 5 \cdot 10^{-3}$; $r_{k+1} = 0,05r_k$; $S_k = 0,8$; $S_{k+1} = 5S_k$; $\beta_k = 1,5$; $\beta_{k+1} = 0,6\beta_k$.

Структурная схема алгоритма (рис. 35) предусматривает использование метода «Лавина» для оптимизации в K этапах с прогрессивным изменением указанных коэффициентов от этапа к этапу. Прием r_k и β_k уменьшается, а S_k возрастает. Опыт эксплуатации программы⁶ показывает, что для получения приемлемых результатов достаточно пройти пять этапов. Если к этому времени величина x^d не достигают дискретных значений, то структурная схема предусматривает организацию нескольких восстановительных этапов с новым карьерированием коэффициентов r_k , S_k , β_k .

Для сокращения времени оптимизации применим комбинированный метод вычисления элементов диаграммы статической устойчивости: она вычисляется по теоретическому чертежу лишь при изменении главных размеров и коэффициентов погоды более чем на 2% их предыдущих значений. Теоретический чертеж генерируется в зависимости от скорости судна. На стадии сложности, когда компоненты вектора независимых переменных меняются в пределах 0,1–0,001%, достаточно осуществлять контроль устойчивости по начальной метацентрической высоте.

⁶ЭМ и инструкция пользователя разработаны кафедрой проектирования судов Николаевского кораблестроительного института.

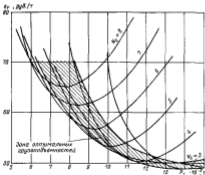


Рис. 34. Зависимость приведенных затрат от грузоподъемности и количества судов на линии

Указанный комбинированный метод позволяет достичь точности вычислений план диаграммы устойчивости в пределах $\pm 0,1\%$ на всех этапах оптимизации при затратах машинного времени около полутора часов вместо одиннадцати. Ограничение на количество ярусов палубных контейнеров по входилости, их число определяется в зависимости от устойчивости судна. При выборе элементов контейнерного выполнения расписания нагрузки (в том числе балласта, если он необходим), мощности главного двигателя, определяются положение и количество переборок и продольных переборок, дымки машинного отделения, баса, кормовой надстройки и др. Результаты оптимизации приведены в табл. 11. Первая строка таблицы свидетельствует о неудачном выборе коэффициента r_k на первом этапе оптимизации. При задании начального значения $r_k = 0,005$ машинное время увеличивается примерно на 15%.

Применяемый здесь способ оптимизации, теоретические основы которого изложены в § 3.3, является универсальным в том смысле, что он пригоден как для решения внешней задачи проектирования (второй

Таблица 11. Расчетный расчет внешней задачи проектирования контейнерности (каждый уровень) Элементы входилости: $Q_1 = 12$ т; $Z = 10\,000$ мкс; Q_2 т/год, — нагрузка. Координаты начальной точки (Q_{10}): $L = 187,8$; $B = 26,8$ м; $T = 0,8$ м; $H = 17,1$ м; $\delta = 0,60$; $r_k = 19,4$ уз. Ограничения: $0,05 < \delta < 0,8$; $8 < L/8 < 8$; $15 < B < 30,8$; $T < 11$ м; $H < 32,3$ м; $0,31 < r_k < 1$; $t_{max} < 80$; $r_{max} > 0,2$ м; $\delta_{max} < 30$. Критерий оптимальности: приемлемые значения F_{opt} (т/год):

Номер этапа	Количество ярусов F_{10}	Значение F_{10} (т/год)	Значения оптимальных параметров в конце этапа оптимизации					
			L , м	B , м	T , м	H , м	δ	r_k , уз
1	2682	37,59	161,3	23,38	6,76	19,88	0,626	21,00
2	1333	24,98	188,2	29,52	9,20	19,15	0,684	21,40
3	211	23,63	202,2	30,95	9,65	20,12	0,878	22,84
4	408	23,59	201,9	30,95	9,61	20,40	0,866	22,81
5	58	23,59	201,9	30,95	9,61	20,40	0,866	22,80

Номер этапа	Количество ярусов контейнеров в трюмах			Объемное количество контейнеров N_k	Масса балласта, P_{bal} т	r_k	r_k	δ_k
	по длине	по ширине	по высоте					
1	—	—	—	640	1830	2,0	0,0	2,17
2	18,626	8,579	7,517	1398	44	0,1	0,17	3,80
3	20,000	9,860	7,882	1743	295	$5 \cdot 10^{-4}$	0,765	1,51
4	20,000	8,999	8,800	1709	119	$2 \cdot 10^{-4}$	3,44	1,26
5	19,999	8,999	8,800	1710	119	$1 \cdot 10^{-4}$	15,3	1,03

Примечания. Всего ярусов: 5222. Время счета на ЭВМ ЕС-1023 91 мин. Элементы устойчивости оптимального судна: $K_{ст1} = 2,89$; $k = 0,31$; $\delta_{max} = 70$; $r_{max} = 99$ м; $\delta_{max} = 45$.

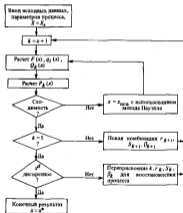


Рис. 35. Структурная схема дискретно-итеративной оптимизации по В. И. Саркисову

ее этап: уточнение технического задания на разработку проекта), так и для решения внутренней (верный ее уровень: определение оптимальных элементов судна). Все зависит от содержания подпрограммы FUN (см. с. 151, 152). В данной задаче подпрограмма FUN включает все необходимые для указанных этапов расчеты: определяются главные размерные, нагрузка судна, координаты центра тяжести, производится расстановка переборок, рассчитываются остойчивость, дифференциалы судна в разных условиях нагрузки, проверяется размещение груза в трюмах. Соответственно увеличивается по сравнению с приведенным в прилоск. 2 объем подпрограммы FUN. Она теперь содержит 12 560 операторов (место 29 и 32). Некоторые изменения (см. указания § 3.3) внесены в подпрограмму MAIN. В остальном пакет „Пауэлл“ по сравнению с прилоск. 1 не изменился.

При современном темпе развития электронно-вычислительной техники знания в области эксплуатации и применения ЭВМ быстро устаревают. Поэтому невозможно сохранять высокую профессиональную компетентность и в области ЭВМ, и в сфере все усложняющегося проектирования судов. Выход из этой конфликтной ситуации для проеканта может быть только один — в пользу совершенствования своей основной специальности. Нужно использовать все преимущества ЭВМ, не вдаваясь с технической стороны их применения. Вследствие быстрого совершенствования вычислительной техники возможности ЭВМ постоянно расширяются, и проектант, непосредственно связанный с машинными расчетами, может находить все новые и новые аспекты применения ЭВМ. В то же время нужно помнить, что возможности ЭВМ, как и любой машины, созданный человеком, ограничены. Поэтому и не следует представлять себе некий управляемый с помощью кнопок мир, где судно может быть полностью спроектировано только благодаря электронному колдовству машин без участия человека. В предыдущих главах показано, насколько разнообразны и сложны процессы проектирования, и он может быть успешно осуществлен только при активном взаимодействии человека с ЭВМ. Рассматривая эту проблему, Т. Джингер использует определение „проектирование и постройка кораблей с помощью ЭВМ“ расценивая их как помощника, как инструмент проектирования [11]. Таким образом, ответственность за результаты проектной деятельности, за эффективность использования систем проектирования лежит на пользователе системы. Следовательно, он должен иметь возможности поступательной в развитии проектантов автоматизированной системы и совершенствовать методы решения своих задач, используя эти возможности, он ведь не желает обладать премудростями проектирования самих САПР. Последнее относится к компетенции специалистов новой профессиональной организации системных и прикладных программистов, специалистов в области вычислительной техники и автоматизированных информационных систем.

Участие специалистов новых профессий в проектировании судов и необходимость одного из взаимопонимания с проектантами обуславливает освоение САПР в течение достаточно длительного периода, в котором неизбежно некоторое увеличение численности проектно-конструкторских подразделений. Дополнительные затраты составляют при этом незначительную долю тех вкладов, которые обеспечивает САПР благодаря более обоснованному и скоординированному принятию решений, сокращению длительности проектирования, повышению роли творческого элемента в процессе проектирования. Итогом внедрения САПР должны являться

значительная экономия трудовых ресурсов в сфере проектно-конструкторских работ.

Непрерывным условием получения наилучших результатов проектирования является диалогный режим работы проектанта с ЭВМ. Поэтому все большее место в составе вычислительных средств САПР должны занимать подсистемы итеративной обработки информации, особенно графической, обеспечивающие автоматизацию анализа и синтеза проектно-конструкторских решений с участием проектанта.

Обобщения опыта взаимодействия проектанта с вычислительной техникой в рамках САПР выдает следующий образ.

1. Процесс взаимодействия начинается с постановки задачи, включая процедуру формирования информационных массивов, необходимых для описания альтернативных решений. В общем случае эффективное выполнение этой процедуры осуществляется человеком, хотя при проектировании сооружений с хорошо обработанным процессом проектирования эту задачу можно возложить на вычислительную технику.

2. Выполняются логические, вычислительные и графические процедуры. Опыт показывает, что эти работы более эффективно выполняет вычислительная техника.

3. На последней стадии проводится анализ полученной в ходе проектирования информации, оценка альтернатив и выбор решения поставленной задачи. Эта стадия предполагает преимущественное использование человеческих способностей.

Взаимодействие проектанта с вычислительной техникой при выполнении указанных этапов возможно в двух вариантах. Во-первых, проектант дает инструкции вычислительной технике и проверяет полученные результаты. Это так называемый параллельный вариант взаимодействия, реализуемый в пакетном режиме. Во-вторых, производится динамическая смена человеческой и машинной деятельности по ходу решения поставленной задачи. Этот процесс характеризуется последовательной организацией взаимодействия и является одним из способов усиления адаптивных свойств САПР, реализуемых в диалоговом режиме.

Большое значение для системного проектирования имеет автоматизированные БД, в состав которых включаются совокупности массивов информации, обеспечивающие реализацию процесса проектирования, языковые средства описания и манипулирования данными, а также средства организации, хранения, накопления и доступа к этим данным. Организация такого банка осуществляется на специализации по проектированию САПР, когда как содержание массивов информации целиком определяется главным конструктором.

При формировании БД важную роль играет достоверность исходных данных по комплектующему оборудованию. В создании судна принимаются десятки, а порой сотни предприятий. Как отмечено выше, их документация превышает по объему проектно-конструкторской документации по судну. Автоматическая регистрация всех возникающих у контрагентов изменений и соответствующее отражение документации проектанта — необходимая мера для обеспечения высокого качества проекта. Поэтому подключение контрагентов к БД остается

одной из насущных задач развития автоматизированных систем проектирования.

Внедрение САПР позволяет разделить весь процесс проектирования судна, от замысла до постройки, на два этапа вместо традиционных четырех (см. гл. 1): системное и конструкторское проектирование.

Первое из них*, занимающая всего около четверти общей трудоемкости разработки проекта, является тем же самым решающим в формировании облика будущего судна, определяющим его свойства и эффективность. На этом этапе проектирования наиболее существенна роль АБД, который может использоваться как в составе САПР, так в традиционных системах проектирования, обеспечивая полную автоматизацию процесса накопления, хранения данных и доступа к ним во всех режимах использования вычислительной техники.

В конструкторском проектировании выполняется детализация проектных решений до состояния построенной документации (изготовление чертежей, кабельных журналов, технических ведомостей и др.) судна — сооружения, состоящего из сотен тысяч деталей и комплектующих изделий, десятки тысяч метров трубопроводов и кабелей и пр. Качество и скорость конструкторского проектирования определяет уровень организации труда на постройке судна. На этом этапе наиболее существенна автоматизация графических работ и изготовление вчерновой документации (спецификаций, чертежей, ведомостей заказа и др.).

Практика использования САПР свидетельствует о целесообразности разделения этих двух крупных этапов проектирования путем создания с одной стороны НИИ „Проектирование судна“, а с другой — интегрированной автоматизированной системы конструкторского проектирования и технологической подготовки производства.

По окончании системного проектирования проект проходит всестороннее согласование и утверждение, после чего приступают ко второму этапу — конструкторскому проектированию и постройке судна. Такая организация проектирования позволяет примерно вчетверо сократить его продолжительность.

* Системное проектирование охватывает предложение, задание и часть технического проектирования: конструкторское — основная часть технологического, рабоче-проектировочное, эксплуатационное, арматурно-сдаточное и сборную документацию.

0001/05 FORMAT IV 7-N 2,8

MAINFOM

DATE

TIME

00.00.00

00.00.00

00.00.00

00.00.00

0 **ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДОМ СОПРЯЖЕННЫХ АПРЯЖЕНИЙ

```

0001 ZINVENION 0ERT44J,1L087,5M20J,1C087,01087,8C087,00K087,1BERPOLER
0002 *J,1TR1010,21K087,087,087087,087,087087,087087,087087
0003 *087087087,087,087087,087,087087,087087,087087,087087,087087
0004 *087087087,087,087087,087,087087,087087,087087,087087,087087
0005 *087087087,087,087087,087,087087,087087,087087,087087,087087
0006 *087087087,087,087087,087,087087,087087,087087,087087,087087
0007 *087087087,087,087087,087,087087,087087,087087,087087,087087
0008 *087087087,087,087087,087,087087,087087,087087,087087,087087
0009 *087087087,087,087087,087,087087,087087,087087,087087,087087
0010 *087087087,087,087087,087,087087,087087,087087,087087,087087
0011 *087087087,087,087087,087,087087,087087,087087,087087,087087
0012 *087087087,087,087087,087,087087,087087,087087,087087,087087
0013 *087087087,087,087087,087,087087,087087,087087,087087,087087
0014 *087087087,087,087087,087,087087,087087,087087,087087,087087
0015 *087087087,087,087087,087,087087,087087,087087,087087,087087
0016 *087087087,087,087087,087,087087,087087,087087,087087,087087
0017 *087087087,087,087087,087,087087,087087,087087,087087,087087
0018 *087087087,087,087087,087,087087,087087,087087,087087,087087
0019 *087087087,087,087087,087,087087,087087,087087,087087,087087
0020 *087087087,087,087087,087,087087,087087,087087,087087,087087
0021 *087087087,087,087087,087,087087,087087,087087,087087,087087
0022 *087087087,087,087087,087,087087,087087,087087,087087,087087
0023 *087087087,087,087087,087,087087,087087,087087,087087,087087
0024 *087087087,087,087087,087,087087,087087,087087,087087,087087
0025 *087087087,087,087087,087,087087,087087,087087,087087,087087
0026 *087087087,087,087087,087,087087,087087,087087,087087,087087
0027 *087087087,087,087087,087,087087,087087,087087,087087,087087
0028 *087087087,087,087087,087,087087,087087,087087,087087,087087
0029 *087087087,087,087087,087,087087,087087,087087,087087,087087

```


08565 FORTRAN IV V.M.2.8 NAFENP DATE 13/09/68 TIME 08:05:09 PAGE 0004

```

4138  STOLANTOL=1
4141  PTOLEMETOL= 1
4142  PTOLEMETOL=0.9
4143  GO TO 12
4144  40 IF (P-PR) 12,20,40
4145  09 0004(0A-01M128-01)=12C-01
4146  CALL OVERP(L2)
4147  1716,16,3,205-PR,
4148  0476
4149  /1726,10,0,1 GO TO 12

```

```

0  DAPARSHCHIKAS ANTICORRUPTSIJE SE VYKRYAKI NADOPRA TONKIE.
1  TONKI ODPARSHCHIKI NADOPRA TONKI OPI.
2
3

```

```

4150  001=0A0830C-081
4151  10270A08108-0A1
4152  1F 0001-01-011 081=002
4153  1F 00-01-01 081=101
4154  20 0-01-01-0-28
4155  01 00 01=0
4156  1F 0A08101101-01-0-081 01101,0-20
4157  01101101101101-01-0-081 01101,0-20
4158  03 01101101101101-01-0-081 01101,0-20
4159  CALL RUN (P,PR,NEXT,02)
4160  1F 1F,01,08,08,081,17,08A0C1 03 TO 12
4161  001=401=44,05
4162  GO TO 04
4163  34 1F 10P10,02,11 WRITE (1,2,3,4)
4164  2A00 FORMAT (1A4,T000A,37A6E AC000000 SE MORET ANTI NADOPRA.)
4165  RETURN
4166  END

```

08566 FORTRAN IV V.M.2.0

NAFENP DATE 13/09/68 TIME 08:07:09 PAGE 0001

```

4891  SUBROUTINE NAFENP (PI,PP,RI,RP,PLAS,R,SEC,NT)
4892  DOUBLE PRECISION PI,PP,ACC

```

```

0  DOPOLNA CROKOVACHTI NISOCFECTI080000 CROKKA DO NAFENY NAFENPA.
1

```

```

0  DIMENSION S(0:PI),R(1:R)
0003  FLAG=0
0004  2 IF (ABS(ZI-PI)+ACC) 3,2,7
0005  5 GO 6,10,8
0006  4 IF (ABS(WL11)+ACC) 5,8,8
0007  4 IF (ABS(WL11)+PP(11)+RI(11)+ACC) 6,6,7
0008  4 IF (ABS(WL11)+PP(11)+RI(11)+ACC) 6,6,7
0009  4 IF (ABS(WL11)+PP(11)+RI(11)+ACC) 6,6,7
0010  7 FLAG=0
0011  7 RETURN
0012  END
0013

```

```

1004  1004
1005  1018
1016  1018
1018  1018
1019  1019
1020

```

08567 FORTRAN IV V.M.2.8

NAFENP DATE 13/09/68 TIME 08:08:09 PAGE 0001

```

4891  SUBROUTINE NAFENP (PI,RI)
4892  DOUBLE PRECISION PI,PI

```

```

0  CALL OVERP(L2)
0003  FLAG=0
0004  2 IF (ABS(ZI-PI)+ACC) 3,2,7
0005  5 GO 6,10,8
0006  4 IF (ABS(WL11)+ACC) 5,8,8
0007  4 IF (ABS(WL11)+PP(11)+RI(11)+ACC) 6,6,7
0008  4 IF (ABS(WL11)+PP(11)+RI(11)+ACC) 6,6,7
0009  4 IF (ABS(WL11)+PP(11)+RI(11)+ACC) 6,6,7
0010  7 FLAG=0
0011  7 RETURN
0012  END
0013

```

```

1004  1004
1005  1018
1016  1018
1018  1018
1019  1019
1020

```



```

        ТОЖА ЭТНЭ МЭХЭЭР ХЕ ХӨӨТ БЭТН БАЛДЛАА.
      # 149 "040642318032190 #4 1.416018 2.1050192 2.2866849
        ТОЖА ЭТНЭ МЭХЭЭР ХЕ ХӨӨТ БЭТН БАЛДЛАА.
      ? 150 "0406424131803160 #4 1.4168241 2.1050442 2.2866890
      # 175 "040642498238120 #4 1.4158949 2.1050368 2.2866419
        ТОЖА ЭТНЭ МЭХЭЭР ХЕ ХӨӨТ БЭТН БАЛДЛАА.
        ТОЖА ЭТНЭ МЭХЭЭР ХЕ ХӨӨТ БЭТН БАЛДЛАА.
        ТОЖА ЭТНЭ МЭХЭЭР ХЕ ХӨӨТ БЭТН БАЛДЛАА.
      # 194 "04064250021642 #6 1.4160200 2.1046017 2.2864848
        ТОЖА ЭТНЭ МЭХЭЭР ХЕ ХӨӨТ БЭТН БАЛДЛАА.
        ТОЖА ЭТНЭ МЭХЭЭР ХЕ ХӨӨТ БЭТН БАЛДЛАА.
        ТОЖА ЭТНЭ МЭХЭЭР ХЕ ХӨӨТ БЭТН БАЛДЛАА.
      # 207 #14162241318042 #4 1.4148200 2.1046000 2.2864859
        ТОЖА ЭТНЭ МЭХЭЭР ХЕ ХӨӨТ БЭТН БАЛДЛАА.
      # 238 "04064260021642 #6 1.4160189 2.1050192 2.2866814
        ТОЖА ЭТНЭ МЭХЭЭР ХЕ ХӨӨТ БЭТН БАЛДЛАА.
        ТОЖА ЭТНЭ МЭХЭЭР ХЕ ХӨӨТ БЭТН БАЛДЛАА.
        ТОЖА ЭТНЭ МЭХЭЭР ХЕ ХӨӨТ БЭТН БАЛДЛАА.
      #248247 10 447 -3455.8880
    
```

```

      #248152 #2 #11845 #2 #12965 #8
    
```

Приложение 2

ПРОГРАММА „ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ФОРМЫ КОРПУСА“

```

MAIN
    
```

```

** * * * * *
** * * * * *
** * * * * *
** * * * * *
** * * * * *
    
```

```

      OS EC FORTRAN AT 56-07-79      MAIN      DATE 11.06.8316821-22.04.84
    
```

```

      C      ДИМЕНСИОНАЛЬНЫЕ ФОРМЫ КОРПУСА
    
```

```

      * * * * *
      * * * * *
      * * * * *
      * * * * *
      * * * * *
    
```

```

      COMMON /V/
    
```

```

      DIMENSION V(100)
    
```

```

      DIMENSION V(100)
    
```

```

      DIMENSION V(100)
    
```

```

      DIMENSION V(100)
    
```

```

      DIMENSION V(100)
    
```

```

      DIMENSION V(100)
    
```

```

      DIMENSION V(100)
    
```

```

      DIMENSION V(100)
    
```

```

      DIMENSION V(100)
    
```

```

      DIMENSION V(100)
    
```

```

      DIMENSION V(100)
    
```

```

      DIMENSION V(100)
    
```

```

      DIMENSION V(100)
    
```

```

      DIMENSION V(100)
    
```

```

      DIMENSION V(100)
    
```

```

      DIMENSION V(100)
    
```

```

      DIMENSION V(100)
    
```

```

      DIMENSION V(100)
    
```

```

      DIMENSION V(100)
    
```

```

      DIMENSION V(100)
    
```

```

      DIMENSION V(100)
    
```

0020	READ J, DELTA,
0021	DELTA = DELTA * 1.00000001
0022	IF DELTA > 0.00000001
0023	GO TO 0020
0024	IF DELTA < 0.00000001
0025	GO TO 0020
0026	IF DELTA > 0.00000001
0027	GO TO 0020
0028	IF DELTA < 0.00000001
0029	GO TO 0020
0030	IF DELTA > 0.00000001
0031	GO TO 0020
0032	IF DELTA < 0.00000001
0033	GO TO 0020
0034	IF DELTA > 0.00000001
0035	GO TO 0020
0036	IF DELTA < 0.00000001
0037	GO TO 0020
0038	IF DELTA > 0.00000001
0039	GO TO 0020
0040	IF DELTA < 0.00000001
0041	GO TO 0020
0042	IF DELTA > 0.00000001
0043	GO TO 0020
0044	IF DELTA < 0.00000001
0045	GO TO 0020
0046	IF DELTA > 0.00000001
0047	GO TO 0020
0048	IF DELTA < 0.00000001
0049	GO TO 0020
0050	IF DELTA > 0.00000001
0051	GO TO 0020
0052	IF DELTA < 0.00000001
0053	GO TO 0020
0054	IF DELTA > 0.00000001
0055	GO TO 0020
0056	IF DELTA < 0.00000001
0057	GO TO 0020
0058	IF DELTA > 0.00000001
0059	GO TO 0020
0060	IF DELTA < 0.00000001
0061	GO TO 0020
0062	IF DELTA > 0.00000001
0063	GO TO 0020
0064	IF DELTA < 0.00000001
0065	GO TO 0020
0066	IF DELTA > 0.00000001
0067	GO TO 0020
0068	IF DELTA < 0.00000001
0069	GO TO 0020
0070	IF DELTA > 0.00000001
0071	GO TO 0020
0072	IF DELTA < 0.00000001
0073	GO TO 0020
0074	IF DELTA > 0.00000001
0075	GO TO 0020
0076	IF DELTA < 0.00000001
0077	GO TO 0020
0078	IF DELTA > 0.00000001
0079	GO TO 0020
0080	IF DELTA < 0.00000001
0081	GO TO 0020
0082	IF DELTA > 0.00000001
0083	GO TO 0020
0084	IF DELTA < 0.00000001
0085	GO TO 0020
0086	IF DELTA > 0.00000001
0087	GO TO 0020
0088	IF DELTA < 0.00000001
0089	GO TO 0020
0090	IF DELTA > 0.00000001
0091	GO TO 0020
0092	IF DELTA < 0.00000001
0093	GO TO 0020
0094	IF DELTA > 0.00000001
0095	GO TO 0020
0096	IF DELTA < 0.00000001
0097	GO TO 0020
0098	IF DELTA > 0.00000001
0099	GO TO 0020
0100	IF DELTA < 0.00000001
0101	GO TO 0020
0102	IF DELTA > 0.00000001
0103	GO TO 0020
0104	IF DELTA < 0.00000001
0105	GO TO 0020

Приложение 3

ПРОВЕРКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЦФ В ЗАДАЧЕ 5 3.4

Чувствительность проверяется по всем возможным параметрам, заданным значениями в параметрах. Ниже показана ее оценка только по коэффициенту общей нагрузки δ . Для этого в программу MAIN встроены 2 после оператора 0019 выходящий оператор

0020 READ J, DELTA,

он переводит δ в параметр. Значения δ вводятся десятичными перфокартами, число которых равно числу значений значений коэффициента общей нагрузки. После оператора, упрощенным способом ЗММ, выводится

EXEC FORGCLG,

который заставляет машину перебрать все перфокарты с данными δ . Кроме того в операторе 0010 записывается указанно оптимизировать две нагрузки (вместо трех в прилож. 1):

0010 NV-2,

а оператор 0026 выводит не шесть три исходных данных (вместо 2 в прилож. 1):

0026 PRINT S, D, VS, DELTA.

В таком виде имеет прилож. 3 использован для проверки чувствительности. Результат приведен в табл. 10. Выделены две модификации расчета: Первая — соотношения L/D и V/T удлиненысь постоянными (оптимальные значения), постоянные в прилож. 3), вторая — при каждом новом значении δ был оптимизирован. Графическая интерпретация результата на рис. 29 указывает, во-первых, дисперсию чувствительности мощности к коэффициенту общей нагрузки среди n , во-вторых, возможность проверки чувствительности объема способом.

Приложение 4

ПРОВЕРКА УСТОЙЧИВОСТИ ОПТИМАЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ 5 3.4

Устойчивость решения проверяется при колебаниях всех исходных данных (заданных значения, параметров, вероятностей, значениях затрат поиска оптимального). Для этой задачи проверка только по коэффициенту δ . Так же, как при проверке чувствительности, используется программа прямой задачи (прилож. 2). После оператора 0019 вводится

0020 READ J, D,

который переводит удлинением в параметр; оно задается столько раз, сколько будет сделано перфокарт с различными значениями D . Кроме того, вводится оператор 0014, осуществляющий только одну задачу по формуле — скорость v_p (вместо 2 в прилож. 2):

0014 READ 2, VS,

В остальном весь имеет прилож. 2 используется без изменений. Результаты приведены в табл. 11 и на рис. 30, откуда видно устойчивость $\delta_{опт}$ к (L/D) $_{опт}$ по колебаниям. Расчетное значение n оптимизации мощности при выбранной в § 3.4 математической модели имеет скорость среди $\psi_n = 108V/L$. Этот показатель абсолютно устойчив по D .

РАБОТА С ПРОГРАММИРУЕМЫМ МИКРОКАЛЬКУЛЯТОРОМ (ПМК)

При отладке ПМК временно доводится ручным образом отладками фрагментов для контроля программного счета. Кроме того, довольно часто бывает необходимо предельно простой основной расчет исключить полностью при ограниченном числе дискретных переменных (для СВУ, составных устройств, кардатов устойчивости, дифференциала и т. д.). Для однородных и вынужденных расчетов целесообразно бо́льшую часть переменных выключить полностью на с начала времен стоимости, не с точки зрения затрат времени. В таких случаях весьма продуктивно используются микрокалькуляторы с программным управлением (например, основанные на программируемых микрокалькуляторах "Электроник Е3-34 или МК-547"). Эти ПМК служат прекрасным примером в разработке алгоритмов расчета. Очень важно то, что эффективность использования бо́льшая ЭИММ таким автоматизированным образом связана с уровнем квалификации оператора программы. При малом уровне квалификации оператора требуется бо́льшая потеря производительности машинного времени на "выполнение" ошибок в программе, либо на продолжение перепробовать возможные варианты программы. Также очень тем бо́льшим, чем бо́льшим число работников получают доступ к ЭИММ. Знакомство с ПМК — прекрасное средство для повышения общей культуры программирования, поскольку поощряет самостоятельный программный счет в та же. Составление программы для ПМК требует осознания того же количества, которое присутствует в каждой программе для бо́льшей машины. Это, в частности, безусловные и условные переходы (передача управления), организация входов, обращения к подпрограммам. Микрокалькулятор типа "Электроник Е3-34" — миниатюрные универсальные вычислительные машины с очень гибкой и выделенной программной системой команд [30].

Работа в режиме программирования на ПМК протекает следующим образом. Пусть требуется вычислить значение дроби

$$\beta = \frac{25 \cdot x + 8\sqrt{y} \cdot 92}{34xy}$$

при размерах x и y . Числовые значения x и y условимся записать в ячейках выходов памяти: x в ячейке ПЗ, а y в ячейке ПД. Поступим таким образом, мы распределим память для решения задачи. Это равносильно присвоению значений переменной при написании программы для бо́льшей машины.

Затем введем в микрокалькулятор программу вычислений, для чего наиболее сложную ППР начнем вводить в режим программирования. В первом углу таблицы выберем номер ячеек 00. Все дальнейшие ячейки любой клавиши будут означать определенную команду в микрокалькуляторе.

Условно можно считать, что в наиболее важной ячейке по пяти дорожкам обозначим коды X, Y, Z, T , причем для каждой команды информация выводится с одной дорожки на другую по определенным правилам, показанным на рис. 36. Две ячейки информации при составлении программы для вычисления β по формуле на табл. 12. Такую таблицу можно рисовать при составлении любой программы на любом этапе работы с ПМК. В первой строке таблицы записывается номера ячеек, они записываются в первом углу таблицы при нажатии клавиши 12, где формируется команда в программу. Коды команд записываются во второй строке табл. 12, где формируется таким образом программа расчета на любом микрокалькуляторе.

По вертикали в таблице показаны пять дорожек магнитной ленты (так называются оперативные регистры). Все вычислительные операции в машине происходят между ячейкой, расположенными на дорожках Y и X , выключаются при этом содержимое дорожки X .

Последовательно нажимая клавиши, обозначенные на второй строке таблицы, вводим программу. Обязательно необходимо закрыть программу клавишей F АВТ. На табло выводится 0 знака для числа, которое там было до программирования. Теперь можно в случае необходимости продолжать вычисления в ручном (автономном) режиме — программа не сбросит

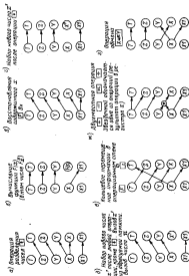


Рис. 36. Передача информации при использовании команды в ПМК (используются строчки на выходе из магистраль памяти)

Нижняя половина таблицы табл. 12 охватывается введением правил вычисления, которые позволяют одновременно увидеть 14 разных чисел. Заполнение этой половины в следующем порядке: набор чисел, начиная с единицы II и номера прямой от 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D. Выше числа (исключая единицы) производится вычисление с использованием клавиши ПП и номера соответствующей ячейки.

Для вычисления по заданной программе можно (после закрытия программы качеством клавиши F А В Т) закрыть исходные данные в память согласно приведенной выше расширенной памяти. Для реализации примера нажатием клавиши 6 П 1 (базисная часть 6 в первую ячейку выданной памяти) и 1 8 4 П Д (базисная часть 184 в ячейку Д). После этого произойдет пуск программы, значение В/В С/П. Через 15-20 с на табло появится результат 0,185.

Если появилась другая часть или слово П/П О Г (ошибка), производится повторную загрузку программы: качество клавиши В/В П П - на табло появится результат первого этапа программы - число 2. Нажатием (в отступке) клавиши ПП произойдет запуск программы на табло. Таким образом, при нажатии на ПП в выданной раз на табло появится число 92, а после ввода качества клавиши 64 - результат вычисления 2 в заданной системе и т.д. Продолжением, на последующий шаг проверки является число 5, но 2, как предусмотрено программой. Это означает, что при введении программы по клавише качество клавиши 2 будет выдана клавиша 5. Программу можно остановить, действуя в следующем порядке: качество клавиш F А В Т, затем В П 15 (оборудованный перевод в шаг 15), F П П (вызовем программу на шаг 15), 2 (выдадим число 2 на дисплейном шаге программы), F А П (закрыть дисплей в программе). Тогда экраном программы вновь В/В С/П. Если экран больше не загорится число 0,185.

Уравнение в отношении ПМК уравнено Макс сумми для оценки его выполнения при различных значениях грузоподъемности. Обобщенное алгебраическое уравнение имеет вид:

$$n_{12} D - n_{11} D^{1/2} - P_{111V} = 0$$

где $n_{12} D$ - разность между полной массой судна D и суммой масс, пропорциональных первой степени водоизмещения (для традиционного традиционного судна это массы метацентрического корабля, масса водоизмещения и шпангоута); $n_{11} D^{1/2}$ - сумма масс, пропорциональных $D^{1/2}$ (масса 3V якорей толкача, оборудованная судна); P_{111V} - постоянные от массы буксирной тросы.

Решение уравнения относительно D модифицированным способом Ньютона (используя "достоиную начальную"):

$$D = D - \frac{n_{12} D - n_{11} D^{1/2} - P_{111V}}{n_{12}}$$

Будем считать, что действительный положительный корень уравнения найден, когда разность между левым и правым частями уравнения близка к нулю. Дробь в правой части уравнения) не превышает 10 г. Структурная схема решения приведена на рис. 37.

$$\text{Итого: } \rho = \frac{28.3 - 897 - 57}{2 \cdot 2} = 0.05 \quad z = 0.1 \text{ (М)} \\ \rho = 0.1 \text{ (М)}$$

000	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99
0000	0001	0002	0003	0004	0005	0006	0007	0008	0009	0010	0011	0012	0013	0014	0015	0016	0017	0018	0019	0020	0021	0022	0023	0024	0025	0026	0027	0028	0029	0030	0031	0032	0033	0034	0035	0036	0037	0038	0039	0040	0041	0042	0043	0044	0045	0046	0047	0048	0049	0050	0051	0052	0053	0054	0055	0056	0057	0058	0059	0060	0061	0062	0063	0064	0065	0066	0067	0068	0069	0070	0071	0072	0073	0074	0075	0076	0077	0078	0079	0080	0081	0082	0083	0084	0085	0086	0087	0088	0089	0090	0091	0092	0093	0094	0095	0096	0097	0098	0099	

рис. 37. Пусть требуется определить водоизмещение трех якорейных судов грузоподъемности 80, 94,5 и 110 т. По нагрузке прототипа установлено, что коэффициент увеличения массы равен: $n_{11} = 0,613$, $n_{12} = 3,84$. Составим программу для решения уравнения $0,185D - 3,84(D^{1/2}) - P_{111V} = 0$:

1) Разорвали память

Заданный параметр	n_{12}	$-n_{11}$	$-P_{111V}$	D	0,607	10
Ячейка памяти						
те	П2	П3	П4	П5	П7	П8

2) Запустили программу в соответствии со структурной схемой в приведенной расширенной памяти:

Минимум	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11			
Классификация	F П П Т	П П Т	П П Т	F А П	П П Т	x	П П Т	x	П П Т	П П Т	x	x			
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
П П Т	= П В F A < 0	39	П П Т	П П Т	= F A < 0	23	П П Т	С П Т	П П Т	П П Т	= П П Т				
28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	Слова
0															
П П Т	00	П П Т	П П Т	= F A < 0	35	П П Т	С П Т	П П Т	П П Т	= П П Т	П П Т	00	F А П Т		

3) Введен числовые значения параметров согласно расширенной памяти: выбрано число 0,613 и введена клавиша П2. Тем самым численное значение n_{12} введено по второй ячейке памяти ПМК. Набрать 3,841 (-), затем качество П3. Тем самым n_{11} введено в третью ячейку памяти. Число 0,607 введено в седьмую ячейку, а 10 в восьмую. При первом пуске программы будет вычислено водоизмещение судов грузоподъемности 80 000 т. Поэтому вводим в четвертую ячейку число 80 000 (-).

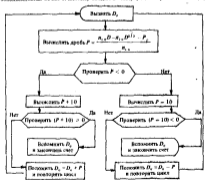


Рис. 37. Структурная схема решения уравнения Макс способом Ньютона с "достоинной начальной"

Будем считать нулевым приближением для β -нормальной точки 80 000. Введем это число в ячейку 5. Ввод данных окончен, и можно запустить программу.

4) Нажать клавиши β/θ CPU. На экране экранчик выводится в продолжении программы. Число 45 с на табло означает результат 109 130, 12. Для вычисления β -нормальной второго судна грузоподъемностью 94 500 т достаточно ввести это число в любую ячейку и число 94 500 β в четвертую ячейку. Ввод делается сразу после окончания результата первого расчета: набираем 94 500 β , затем 94 500 β β , затем β/θ CPU. Число 45 с означаем результат 128 232,86. Для определения β -нормальной третьего судна вводим в четвертую и пятую ячейки соответственно числа 110 000 β и 110 000 и вводим программу. Результат 149 908,59.

Некоторые замечания и программы.

1. Указанный период $F \times t < 0$ осуществляется следующим образом. Если указанный заданием, то программа работает столько же, сколько задано после окончания и прерывается до команды CPU. Если не выполняются, то в стандартном после окончания сравнения задано указывается адрес, с которого должно продолжаться расчет.

В двукратной программе перво сравнение проводится на заданном этапе. К этому времени дробь β уже вычислена и занесена в пятую ячейку памяти. Теперь если $\beta < 0$, то программа пойдет с 17 шага дальше, а если $\beta > 0$, то перейдет к 29 шагу и начнет вычисления с 30 шага.

2. Безуказанный период (BП) определяет расчет на шаг, номер и номер указанным непосредственно зад командой перевода. В примере это 80, т. е. после 25-го шага программа возвратится к указанной кату и начнет работать с шага 01.

3. Для решения уравнения масс другого типа судна следует согласно приложению распределить занести сделать новый шаг данных, соответствующий этому типу и загрузить программу.

Для заданная таблица расчетов, содержащая 20 строк (т. е. 20 параметров) и 150 граф (т. е. 150 параметров), на ПМК требуется около 3 ч.

1. Афанасов В. В. Проектирование судов. Л., Судостроение, 1983.

2. Афанасов В. В. и др. Определение элементов ядра жесткости стержневых судов в задаче оптимальной их компоновки. - Судостроение, 1977, № 2, с. 5-8.

3. Белкин Ю. В. Исследования графика в судостроении. Л., Судостроение, 1983.

4. Бердников П. Д., Маринин В. А. Автоматизированная проектировка каботажных судов. Л., Судостроение, 1978.

5. Бреслав Д. В. Технологико-экономическое обоснование ядра основной морской оконки. Л., Судостроение, 1982.

6. Бронштейн А. В. Морские проектировочные суда. Л., Судостроение, 1966.

7. Бронштейн А. В., Глазкова М. К., Колпакова В. В. Основы выбора конструкции ядра судов. Л., Судостроение, 1974.

8. Буянов В. М. Вопросы оптимальности требований и надежности судов. Востр. судостроения, сер. Проектирование судов, вып. 2, Л., Судостроение, 1972.

9. Виноградов А. Н. Естественная форма ядра поддубовой оконки судов. - 8 кн.: Проектирование и конструкция судов. Николай, Изд. НКХ, 1982.

10. Виноградов А. Н. Теория проектирования судов. Ч. I-III. Николай, Изд. НКХ, 1978-1980.

11. Виноградов А. Н., Каминский Ю. Т., Цыбенко В. А. К определению элементов ядра с горизонтальной погрузкой. - Тр. НКХ, вып. 59, Николай, 1972, с. 41-48.

12. Виноградов А. Н., Виноград В. Н., Цыбенко В. А. Методы оптимизации в проектировании судов. Ленинград, изд. НКХ, 1976.

13. Гайкович А. И. Алгоритмы ядра арктических судов для арктических судов в арктических условиях. - Сравнительные проблемы проектирования судов. Л., НКХ, 1983, с. 29-37.

14. Гайкович А. И. Оптимизация элементов и характеристик контейнерных судов с использованием ЭВМ. - Судостроение, 1975, № 8, с. 15-16.

15. Гайкович А. И., Цырен В. А. Приемы построения математической модели оптимизации элементов контейнерного судна. - Тр. НКХ, вып. 83, Л., 1974, с. 33-38.

16. Гайкович А. И., Цырен В. А. Приемы построения математической модели оптимизации элементов контейнерного судна. Л., Судостроение, 1985.

17. Гейнтер Н. И., Нелюцкий М. Б., Погова А. А. Математика и алгоритмы в автоматизации проектирования судов. М., Земляника, 1975.

18. Демидович В. П., Марон М. А. Основы математической математики. М., Физматгиз, 1963.

19. Дорва В. С. Общие вопросы построения системы автоматизированного проектирования судов. - Востр. судостроения, вып. 21, Л., Судостроение, 1979, с. 3-32.

20. Навальнов А. Г. Модульный метод самоорганизации модели сложной систем. Киев, Наукова думка, 1982.

21. Коля П. И. Анализ модели проектирования судов на чувствительность. - Судостроение, № 11, 1974, с. 9-11.

22. Коля П. И. Проектирование и архитектура кораблей. Ч. II. Вара, изд. Высшего машиностроительского института, 1979.

23. Краев В. И. Экономические обоснования при проектировании морских судов. Л., Судостроение, 1981.

24. Краев В. И. Структура ядро-математической модели традиционного контейнерного судна в задаче оптимизации его компоновки. - Тр. НКХ, вып. 340, Николай, 1978.

25. Мак-Крукин Д., Дора У. Числовые методы и программирование на ФОРТРАНе. М., Мир, 1977.
26. Милоцкий М. М. Метод статистического процесса (анализа). - Впер. судостроения, сер. Математические методы, вып. 8, Л., Судостроение, 1975.
27. Михайлов Б. И. Проектирование судовых корпусных конструкций. Тел. докт. Восточн. научно-исл. конф., Николаев, 1983.
28. Мусович И. И. Математические задачи системного анализа. М., Наука, 1981.
29. Нарубин А. А. Введение в теорию обоснования проектных решений. Л., Судостроение, 1976.
30. Новиков В. В. Математические модели и точность инженерных расчетов. - Судостроение, №7, 1979, с. 5-12.
31. Овца Д. М. Проектирование морских судов. Л., Судостроение, 1964.
32. Определение эффективности мультимодальных вложений на транспорте. - Сборник трудов, вып. ВТФД ред. Л. В. Каторочев, В. И. Пикави, М., ВНИИ системных исследований, 1982.
33. Оган М. И. Методы автоматизированного проектирования летательных аппаратов. М., Машиностроение, 1984.
34. Павлов В. М. Критерия для оптимальной оптимизации подводных судов. Л., Судостроение, 1976.
35. Павлов В. М. Оптимизация судов. Л., Судостроение, 1983.
36. Павлов В. М., Селевич Ю. И. Системы автоматизированного проектирования судов. Л. Изд. НКМ, 1981.
37. Петренко А. И. Основы автоматизации проектирования. Киев, Техника, 1982.
38. Петровская Ю. В. Разработка строней по алгоритмам и конструктивной методике с помощью ЭВМ. Николаев, изд. НКМ, 1979.
39. Подольнова А. И. и др. Алгоритмы оптимизации проектных решений. М., Энергия, 1976.
40. Пономарев Ю. И. Некоторые вопросы решения задачи оптимизации характеристик судов в стохастической постановке. - Впер. судостроения. Сер. Проектирование судов, вып. 21, Л., Судостроение, 1979.
41. Прайс М. Д. Матричные графика и автоматизация проектирования. М., Советское радио, 1975.
42. Пронудин С. А., Кузнецов В. П., Богданов А. Т. О некоторых особенностях формирования логико-математической модели судов с горизонтальной погрузкой. - Тр. НКМ, вып. 99, Николаев, 1975.
43. Раков А. И. Оптимизация основных характеристик и элементов подводных судов. Л., Судостроение, 1978.
44. Савицкий К. П. Стандартная программа оптимизации многопараметрических систем методом градиентного поиска. - В кн.: Алгоритмы и программы случайного поиска. Киев, Знання, 1969, с. 12-21.
45. Савицкий Ю. П. Организация процесса структурного синтеза объектов судостроительной техники в САПР. - В кн.: Проектирование судовых корпусных конструкций. Тел. докт. Восточн. научно-исл. конф. Николаев, 1983.
46. Савицкий Ю. С. Оптимизация выбора корпуски. М., ВМ МО СССР, 1973.
47. Савицкий Ю. И. Общие принципы построения ЭВМ и особенности учета требований по экономике и количеству при оптимальном проектировании перспективных двухкорпусных грузовых лайнеров. - Тр. НКМ, вып. 140, Николаев, 1978.
48. Саркисов В. И. Некоторые особенности алгоритма оптимизации главных элементов кораблестроения. - В кн.: Проектирование и конструкция судов. Сб. тр. НКМ, Николаев, 1982.
49. Тел. докт. Восточн. конф. "Автоматизация проектных и конструкторских работ". М. Изд. МАН, 1979.
50. Трошинко А. К., Лыбин Ф. Д. Некоторые расчеты на программных микрокалькуляторах. Киев, Техника, 1985.
51. Хитяевский Д. Прикладное применение программирования. М., Мир, 1975.
52. Хос Э., Араба Н. Прикладные оптимальные проектирование (Математические системы и конструкции). М., Мир, 1983.
53. Хуанго Л. И. Математические проектирование кораблей. Л., Судостроение, 1982.
54. Цыганов В. А. Построение теоретического чертежа с помощью ЭВМ. Николаев, Изд. НКМ, 1979.
55. Цыганов В. А., Струмицкий И. В. Методы машинного проектирования и оптимизации судов. Николаев, Изд. НКМ, 1983.
56. Шурт Э. А., Николаевский В. И. Особенности формирования математической модели судов с помощью САПР. - Судостроение, №5, 1984, с. 8-9.
57. Шурт Э. Решение инженерных задач на ЭВМ. М., Мир, 1982.
58. Чичков В. С. Основы проблем организации проектирования в судостроении. Л. Изд. ин-та подвод. квалиф. руковод. работ и обучения судостроит. инженерам, 1982.

Предисловие	3
Выдаче	4

Глава 1

ОСНОВЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

1.1. Системы автоматизированного проектирования	9
1.2. Программное обеспечение САПР	21
1.3. Пакеты проектных программ	30
1.4. Средства обучения и диалоговые подсистемы	33
1.5. Организация проектно-конструкторских работ в традиционной и автоматизированной системах проектирования	37
1.5.1. Стадии традиционного проектирования судна	38
1.5.2. Технологическая задача	39
1.5.3. Технологическое предложение	40
1.5.4. Эскизный проект	42
1.5.5. Технологический проект	44
1.5.6. Рабочая документация	45
1.5.7. Организация проектирования	47
1.5.8. Правила работы в системе автоматизированного проектирования	50
1.5.9. Системный подход к проектированию	51

Глава 2

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

2.1. Классификация величин, используемых в математическом моделировании	55
2.2. Математическая модель судна	56
2.3. Понятия взаимосвязи, необозначенности, особенности и полноты в математической модели судна	58
2.3.1. Взаимосвязь судна	61
2.3.2. Условие неизотонности	62
2.3.3. Структура по начальной отклоненности	66
2.3.4. Баланс масс судна	68
2.4. Оценка экономической эффективности в математической модели судна	71
2.4.1. Структура удельных приведенных затрат	78
2.5. Критерии оптимальности конструкции	83

Глава 3

МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ

3.1. Методы математического программирования	91
3.2. Приближенные способы поиска оптимума	91
3.3. Прямой метод нелинейного безусловного поиска „Дарвина“	95
3.4. Пример оптимизации формы корпуса методом сопряженных направлений „Дарвина“	99

Глава 4

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПТИМИЗАЦИИ

§ 4.1. Достоверность результатов	107
§ 4.2. Устойчивость решения, чувствительность	110

Глава 5

ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АППАРАТА ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДНА

§ 5.1. Проверка оптимальности значений качества судна	121
§ 5.2. Оптимизация характеристик в зонах конвейерного метода дискретно-непрерывного программирования	126

Заключение

Приложение 1. ПАКЕТ ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ „ДАВУЛ“	130
---	-----

Приложение 2. „ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ФОРМЫ КОРПУСА“	151
--	-----

Приложение 3. ПРОВЕРКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЦФ В ЗАДАЧЕ § 3.4.	153
--	-----

Приложение 4. ПРОВЕРКА УСТОЙЧИВОСТИ ОПТИМАЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ § 3.4.	153
--	-----

Приложение 5. РАБОТА С ПРОГРАММИРУЕМЫМ МИКРОКАЛЬКУЛЯТОРОМ (МКМ)	154
---	-----

Указатель литературы	159
----------------------------	-----