

В. В. Ашин

Проектирование СУДОВ

Издание второе,
переработанное и дополненное

ДОПУЩЕНО

Министерством высшего и среднего специального образования СССР
в качестве учебника для студентов вузов,
обучающихся по специальности
«Судостроение и судоремонт»



Рецензенты:

кафедра Николаевского кораблестроительного института
док. техн. С. О. Макарова
(кажд. техн. наук А. Н. Васильевой, канд. Е. Г. Фера

Уд 4158

Аким В. В.

А98 Проектирование судов: Учебник. — 2-е изд.,
перераб. и доп. — Л.: Судостроение, 1985. — 320 с., ил.
ИСБН

В учебнике изложены материалы и мероприятия с программой курса «Проектирование судов». В частности подана область движения тросовых механизмов выбора оптимальных параметров проектирования судов с учетом технологических требований.
Предназначен для студентов высших учебных заведений в области

А 360803000—090
048(01)—85 17—85

30.42-01

Учебник написан автором на основе курса лекций для студентов, обучающихся по специальности «Судостроение и судоремонт». В нем рассматриваются основные закономерности, совокупность которых составляет общую теорию проектирования судов, и прежде всего вопросы проектирования однокорпусных водонемцающих судов. Многокорпусные суда и суда с динамическими принципами поддержания в книге не анализируются, но общая теория дает основы для проектирования и этих судов.

Следует отметить, что за последние годы область применения теории проектирования значительно расширилась. Она стала служить не только для обоснования оптимальных эксплуатационных характеристик судна, заключаемых в задании на проектирование, но и для решения вопроса оптимизации флотов. В связи с этим в ряд глав учебника внесены элементы теории вероятности и обращено особое внимание на математическое выражение содержания в целом. Вместе с тем из книги исключено все то, что дублирует курсы лекций по другим судостроительным дисциплинам, входящим в учебный план специальности.

В настоящем издании учебника по сравнению с первым изданием в главах 1, 2, 5, 9, 10 и 12 внесены наибольшие изменения, в остальные главы — коррективы, сделанные на основе восьмилетнего использования учебника на практике, а также по замечаниям специалистов, которым автор выражает благодарность.

Глава 12, в которой рассмотрены вопросы применения ЭВМ и специальных математических методов при проектировании отдельных судов и флотов, написана докт. техн. наук, проф. В. М. Пашиным.

Автор приносит благодарность коллективу кафедры проектирования судов Ленинградского кораблестроительного института: А. В. Бронникову, В. Н. Клементьеву, В. М. Пашину, А. В. Букашеву, Г. Ф. Девелько, О. А. Халпазову, А. И. Гайкоичу, А. С. Захарову, Ю. И. Семезову, Л. В. Хропиной, А. П. Жуковой, М. А. Осиповой и особенно И. В. Чедлакову и В. А. Цареву — за активную творческую помощь в создании книги.

Предмет теории проектирования судов. История ее развития. Создание судна — сложный процесс, основными этапами которого являются проектирование судна и его постройка. Назначение судна определяется целью его эксплуатации. Задание на создание судна должно соответствовать этому назначению.

Выдающийся русский кораблестроитель Иван Григорьевич Бубис (1872—1919) четко определил: «Задача проектирования судна заключается в составлении таких чертежей его, чтобы построенное по ним судно удовлетворяло всем заданным, положенным в основу составленного проекта. Таковыми заданиями для коммерческого судна являются, например, грузоподъемность, род перевозимого груза, объем пассажирских помещений, скорость судна, район плавания, система двигателя, род топлива, достаточная прочность всех частей судового корпуса, надлежащая остойчивость в мореходные качества и многое другое».

Для военного судна добавляются еще задания, характеризующие его артиллерийское и миновое вооружение, бронированную защиту и прочее.

Имея готовые чертежи и нагрузку судна, им в большинстве случаев можно установить, каким именно заданием будет удовлетворять построенное по этим чертежам судно; многочисленные и часто очень сложные расчеты, которые нужно произвести для этого, и представляют предмет теории корабля, строительной механики корабля, судовой механики и электротехники и разных других отделов обширной науки кораблестроения. При проектировании возникает обратная задача — создать чертежи судна, удовлетворяющего определенным заданиям; легко понять, насколько трудная и сложна эта задача по сравнению с первой» [31, с. 243]. Разработкой методов решения задачи проектирования занимается наука, названная советским академиком Валентином Львовичем Поздним (1885—1948) теорией проектирования судов. Предметом теории проектирования судна является прежде всего изучение связи между характеристиками свойств судна, определяемых заданием, а также действующими нормами, с одной стороны, и характеристиками размеров и формы судна, с другой.

Характеристиками судна по заданию и нормам являются, например:

для грузоподъемности — ее абсолютная величина, коэффициент использования водоизмещения по грузоподъемности;

для грузоемкости — ее абсолютная величина и удельная грузоемкость;

для ходкости — скорость в различных условиях (на испытании, эксплуатационная и т. д.);

для остойчивости — абсолютная и относительная метацентрическая высота, угол захвата диаграммы Рида и т. д.;

для качки — период собственных колебаний, их размеры.

Примерами характеристик размеров и формы судна являются его так называемые главные элементы. К ним относятся характеристические размеры — водоизмещение, главные размеры (L — длина, B — ширина, T — осадка, H — полная высота борта) и характеристичная форма — коэффициенты полноты (или формы): общей полноты δ , продольной остроты ϵ , полноты модели (или шпангоута наибольшего сечения) β , полноты грузовой интерлинии (B/L) α и др.

К характеристикам размеров и формы судна относятся и ряд качек, которые не являются главными элементами. Это — отношение длины судна L , соотношению размеров, построение грузовой ВЛ ($\Gamma B/L$) и многое другое.

Встречаются случаи, когда некоторые характеристики размеров, например диаметр, составляют предмет задания.

Так как отдельные характеристики размеров и формы судна связаны между собой, теория проектирования судов занимается установлением связей между ними, например между коэффициентами полноты модели и коэффициентом общей полноты.

История развития теории проектирования судов не изучена подробно, однако можно с уверенностью сказать, что основы ее были заложены в середине XVIII в. К этому времени парусные суда достигли высокой степени совершенства, а на кораблестроение повлияли достижения технической революции, в процессе которой сталь была заменена металлической плитой, а дерево как строительный материал — металлом. Появление дифференциального и интегрального исчисления способствовало в этот период применению математического анализа в кораблестроительных науках.

В трактате Буле «Теория корабля» (1746) говорится, что еще в 1681 г. французские кораблестроители обсуждали вопрос применения математических методов проектирования судов. В этом же трактате Буле приписует изобретение в начале XVII в. предложенная им же П. Торра считать лучшим протипом для любого судна Ноев ковчег.

В книге известного французского кораблестроителя Дюамеля дю Монсо «Начала корабельной архитектуры» (1752) высказывались соображения о значении протипов и математических методов в проектировании. Автор предлагает определять длину боевых кораблей только из условия размещения пушечных портов, а ширину и высоту борта — на основании на построенных ранее судах отно-

шейн дни и высоты борта к ширине. Из сказанного следует, что размеры корабля выходяли из условий обеспечения остойчивости. Никакой связи между заданием и водонесущим не устанавливалось. Водонесущие и соответствующую ему борсуку определяли после изготовления теоретического и конструктивных чертежей судна. Такой подход, впервые реализованный английским кораблестроителем А. Динем (1638—1721), оценивался автором как более совершенный по сравнению с принятым ранее способом определения осадки и обычаем прогнать орудийные порты после спуска судна на воду.

Однако в такая постановка вопроса уже не удовлетворяла передовых кораблестроителей, среди которых следует отметить Фридриха-Гейнриха Чапмана (1721—1808). Кроме практической деятельности на шведских верфях, он занимался научными исследованиями, в ходе которых им был поставлен основной вопрос теории проектирования судов — о зависимости водонесущения и главных размеров судна от задания на его проектирование. В своих работах 1775 и 1806 гг. Чапман решал этот вопрос путем составления уравнения весов (масс) в функции водонесущения. Связь масс с водонесущением была установлена им путем статистического анализа. Чапман попытался также связать вес полезного груза с водонесущением судна и его главными размерениями, учитывая, довольно приблизительно, и требования остойчивости.

Интересны также исследования Чапмана, касавшиеся обобщенных формы корабля. На основе опытов в бассейне для определения положения шпангоута наибольшего сечения и отстояния центра волнителя (ЦВ) от орудийной длины судна он разработал пригодные для его эпохи рекомендации, но противоречивые современным исследованиям в этой области. Он же предложил выработать поверхность судна формулами (параболический способ) и составить таблицы с указанием данных кораблей, спроектированных по его методу при закономерно изменяющихся полезной нагрузке и других общих проектных характеристиках. Такие таблицы сегодня рассматриваются бы как попытка создания стандартной «сетки» судов. Впрочем, подобная попытка наблюдалась и в более ранний период у Дюроеля до Момо и у его английского переводчика М. Морен.

Ф.-Г. Чапман оказал большое влияние на практику проектирования судов. Его работы переводились на многие языки, и в частности на французский и русский.

Связь главных размеров судна и его коэффициентов полноты с остойчивостью изучал знаменитый математик, академик неаполитанской Академии наук Леонард Паллотти Эйлер (1707—1783). Он составил уравнение остойчивости, связывающее ширину, осадку и коэффициенты полноты судна с его начальной остойчивостью. Приняв составление этого уравнения, называющегося одним из основных уравнений теории проектирования судов, не замедлил до наших дней. Решив рассматриваемую задачу, Эйлер получил приближенные формулы для метacentрического радиуса и возмещения ЦВ над основной плоскостью. Эти формулы автор не связывал с ка-

кими-либо типом обвода (кроме чапмановских, параболических), поэтому они универсальны.

Исследования Эйлера были опубликованы на русском, французском, английском и итальянском языках, но скоро были забыты, как, впрочем, и формула Эйлера для устойчивости сжатых стержней. Впоследствии некоторые авторы приходили к формулам Эйлера совершенно самостоятельно.

В XIX в. завершилась техническая революция, приведшая к введению в судостроение механических двигателей и металлического корпуса. В этот период можно отметить деятельность в первую очередь М. М. Окулева и Ж.-О. Нормана, работавших над отдельными вопросами теории проектирования судов.

Русский корабельный инженер Михаил Михайлович Окулев (1810—1873), стремясь к рациональному решению основной задачи проектирования судна, составил уравнение весов (масс) и предложил приближенные формулы для расчета остойчивости по главным размерениям и коэффициентам полноты. Результаты своих работ он опубликовал в 1836 и в 1865 гг. Уравнение весов (масс) представлено М. М. Окулевым в виде, более общего и более близком к современному, чем Ф.-Г. Чапманом. Но, так как работа Эйлера осталась неизвестной Окулеву, ему не удалось дать уравнение остойчивости в форме, столь законченной и близкой к современной, как это сделал Эйлер за 60 лет до него.

Французский инженер, представитель рода Норманов из Гаэра, занявшийся в течение двух веков кораблестроением, Жак-Огюстен Норман (1839—1906) исследовал многие вопросы кораблестроения и морского машиностроения, но наиболее глубокий след оставил в развитии теории проектирования судов.

Приняв иррациональным решать основные вопросы проектирования вне опыта, Норман сосредоточил еще в 1830 г. внимание на создании таких приближенных формул, которые позволят решить целый вопрос, иногда очень сложный, к одной или двум формулам, где легко можно будет увидеть влияние каждого элемента, например, веса корпуса или механизмов, расхода топлива или района плавания, толщины брони у бронированных кораблей. В том же году он опубликовал свои полученные всемирную известность приближенные формулы элементов теоретического чертёжа. Первые его разработки в этом направлении были опубликованы еще в 1864 г. Работы Эйлера и Окулева остались ему неизвестными, и он, по-видимому, считал себя первооткрывателем формул теоретического чертёжа, не связывая их с определенной геометрией поверхности, с которой снимались такие формулы известной ему Чапману.

Норману принадлежит идея дифференциального метода определения водонесущения. В 1865 г. он показал, применяя указанный метод, что водонесущение проектируемого судна растет значительно быстрее веса (массы), который в силу изменения задания на проектирование судна добавляется к весам (массам) по отдельным разделам нагрузки судна-прототипа. Отношение приращения

отношения к проектируемому весу (массе) по степени загрузки судна приращению получило название коэффициента Нормана.

Норман, вслед за Эйлером и Окунами, не считал целесообразным игнорировать при проектировании поверхности корпуса судна аналитически задаваемые кривые, как это делал Чапман. Тем же путем исследователи Чапмана продолжили разработку аналитических методов построения теоретического чертежа. Наиболее ранняя работа этого направления принадлежит русскому корабельному инженеру Александру Андреевичу Полову (1786—1859), пытавшемуся применить кривую прогрессии, впервые полученную Дюамелем де Монто графически, в проектировании теоретического чертежа. Идея А. А. Полова разрабатывалась и другими авторами.

Несмотря на переисчисленные работы, в литературе начала XX в. вопросы, ныне объединяемые теорией проектирования судов, были освещены слабо, особенно такой важный вопрос, как определение водоизмещения и главных размерений судна. Этот факт был отмечен Ж.-О. Норманом в 1901 г.

Открытие кораблестроительного отделения* Петербургского политехнического института в 1902 г. и назначение его деканом Константином Петровичем Боклевским (1862—1928) дало толчок развитию проектирования судов [6], поскольку им был подготовлен курс [24], излагавший теорию проектирования судов, или, как отмечалось во втором, не вышедшем в свет издании курса, «науку, указывающую общие методы и приемы для расчета и составления чертежей различного типа судов».

Крупным вкладом в развитие теории проектирования судов стал уже упомянутый выше доклад И. Г. Вуликоа [31], прочтенный им в 1916 г.

Следя за развитием теории проектирования судов, нельзя не отметить отдельные консервативные взгляды. В частности, в известной книге английского профессора Байбейса** «Проектирование и постройка судов» нельзя найти ни одной строчки по основному вопросу проектирования — определению главных размерений и формы судна. Автор считает, что «лучшая помощь студенту сделается опытным проектировщиком, единственным путем к этому — делать проекты». Этот взгляд автора строго соответствует стремлению капиталистических фирм сохранить методику проектирования в тайне. Однако развитие кораблестроения требовало и совершенствования его научной базы. В 1920 г. появился труд профессора Массачусетского технологического института (США), датчанина по происхождению, У. Ховгарда «Проектирование боевых кораблей», в котором были изложены пути нахождения их главных размерений и коэффициентов формы. Общие принципы, изложенные в ра-

боте У. Ховгарда, могли быть использованы также для проектирования гражданских судов.

Значительный шаг в деле развития теории проектирования судов сделал ученик К. П. Боклевского академик В. Л. Поддonna, опубликовавший в 1926—1927 гг. монографию «Основы проектирования морских коммерческих судов» [71], которая легла в основу изданной в 1935 г. первой части учебника под названием «Теория проектирования судов» [72]; за ней последовал выпуск в 1938—1939 гг. еще двух частей этого учебника [73]. Рассматривая эти работы, следует отметить стремление автора к уточнению границ теории проектирования, классификация предметов и методов проектирования. В них указаны способы учета экономических факторов, намечены пути создания методов определения главных размерений и коэффициентов общей полноты судна. В. Л. Поддonna обратил особое внимание на применение статистики к проектированию судов, а именно, ограничившись определением статистических средних [8, 17, 21].

Статистические формулы В. Л. Поддonna позволяли получать лишь средние значения исходных величин, поэтому эти формулы в начале 30-х гг. подверглись критике со стороны Л. М. Ногиды, который указал, что, не ориентируясь на средние величины, можно создавать ряд вариантов проекта судна по одному и тому же заданию (так называемый метод вариантов или метод сравнения вариантов).

Этот метод, созданный В. Л. Поддonnaми и развитый Л. М. Ногидом (1892—1972), заложил основы исследовательского проектирования и оптимизации проектов, так как появилась возможность из вариантов проекта, имеющих целый ряд разных характеристик, выбрать наилучший. Однако сами отклонения от средних статистических не входили в статистические формулы этих авторов, а пределы, в которых изменялись проектные величины, замечались на глаз. Только много позже было предложено отражать колебания статистических величин в самих формулах [3, 10].

Стремление дать необходимый материал для обоснованного выбора характеристик судна обусловило появление в СССР в 1932 г. работ профессора В. А. Лаптева «Основы проектирования морских коммерческих судов» [52] и в 1940, 1954 гг. — профессора А. И. Солдатовича «Проектирование кораблей» [22]. Эти книги содержали основы теории проектирования и указывали практические пути ее использования.

Вышедший в 1935 г. учебник профессора Л. М. Ногиды «Теория проектирования судов» обобщил предыдущие исследования по теории проектирования, в том числе и собственные [62]. Часть материала, содержащаяся в учебнике, была позже переиздана в расширенном виде [63—66].

Следует отметить, что в последнее время теории проектирования судов уделяется внимание и за рубежом. Например, в США появилась книга Д. Ч. Макиннига «Теория и техника проектирования кораблей» [56]. В ней рассматриваются общие теоретические

* Ныне кораблестроительный факультет Ленинградского ордена Ленина политехнического института (ЛПИ).

** Публиковался в 1984 г. книга Т. К. Гилмера «Проектирование современного корабля» также не содержит методов прямого определения размеров и формы корабля.

положения по проектированию как военных кораблей, так и торговых судов.

В настоящее время задача проектирования судна, а следовательно теории проектирования судна, значительно расширилась. Дело в том, что состав задания, упоминаемый И. Г. Бубновым, — грузоподъемность, вместимость, скорость и другие характеристики свойств судна, — не должен иметь внутренних противоречий. Совместимость всех требований задания должна быть проверена методами теории проектирования судна.

Плановое хозяйство социализма требует планирования состава целых флотов (сухогрузного, военного, промышленного). Переход к их проектированию и далее к проектированию их подфлотов требует рассмотрения этой задачи с учетом совместности заданий на эти суда, и, таким образом, теория проектирования судна оказалась родственной и решение и этой задачи.

А. В. Бронников, рассматривая указанные задачи [27], разделяет их на внутренние (проектирование судна по заданию в будущей постановке) и внешние (разработка задания на проектирование судна). Выше последней задачи иерархически стоит проектирование целых флотов.

Общий характер исследований в рамках теории проектирования и ее методология, основанной на этой теории, может быть определен как аналитический, при этом постепенно возрастает роль использования математических дисциплин. Полноту следует отметить и возмещение интереса к аналитическим методам построения теоретического чертежа (работы И. А. Яковлева, академика Г. Е. Павленко и др.).

Еще более повлияла на углубление процесса математизации проектирования судов необходимость решения внешней задачи, особенно в зерне ее ядра — при проектировании флотов, из-за сложности, громоздкости этого ядра. Для этих целей стало целесообразным применение ЭВМ, что вызвало стремление использовать их при решении внутренней задачи. В значительной мере это объясняется желанием перейти в области методологии проектирования к его автоматизации.

Этот процесс осложняется из-за стремления автоматизировать не только решение задачи обзора проектирования, т. е. определение основных характеристик судна, но и последующие этапы, т. е. составление рабочих чертежей.

При проектировании судов определенного назначения для каждого из них существуют особенности, подлежащие первоочередному исследованию, как указывал еще К. П. Боклевский [24].

Такие исследования приобретают в последние время все возрастающее значение [33, 39, 77, 78].

Подробный перечень литературы по истории развития теории проектирования судов приведен в первом издании учебника.

Методы теории проектирования судна. Ее связь с другими дисциплинами. Для решения задач, стоящих перед теорией проектирования судна, получен ряд уравнений. Некоторые из них упомина-

ются выше. Важнейшим является уравнение масс, ранее называвшееся уравнением веса. По нему можно определить наиболее общую характеристику размеров судна, стоящую во главе иерархической лестницы проектирования судна — его водоизмещение. Далее по значимости следует выделить уравнения вместимости и устойчивости. Иногда алгоритм определения мощности энергетической установки судна называют уравнением мощности.

Выше приведено высказывание И. Г. Бубнова о том, что задача проектирования судна является обратной по отношению к задачам других кораблестроительных дисциплин. Отсюда очевидно значение этих дисциплин для определения связи между некоторыми проектными характеристиками, например, между прочностью и массой корпуса судна, а также проверки правильности характеристик судна, получаемых на уравнениях теории проектирования судов, и другими ее методами.

Теория проектирования судна наиболее широко использует данные исследований по теории корабля, касавшиеся вопросов плавучести, устойчивости, непотопляемости, качки, ходкости, поскольку именно эти свойства определяют возможность существования судна как плавучего сооружения. Желательно, чтобы в результате работ по строительной механике корабля и конструкциям корпуса шире использовались при создании методов определения массы корпуса.

Развитие машиностроения, электротехника, автоматика, приборостроение оказывают существенное влияние на нагрузку судна и габариты судовых помещений, что учитывается в основных зависимостях теории проектирования судов: в уравнении масс и уравнении вместимости.

Уже на начальных этапах разработки проекта судна следует учитывать особенности процесса его постройки, т. е. учитывать те поколения, которые придут к упрощению и удешевлению технологии его постройки, и это может отразиться прежде всего на проектировании его обводов и на унификации, например, его надстроек и рубок. При этом особое внимание должно быть обращено на ремонтопригодность, например на возможность замены двигателей для агрегатного ремонта.

И наконец, отметим, что теория проектирования очень тесно связана с экономикой, которая позволяет оценить еще в процессе проектирования эффективность принимаемых технических решений и будущую экономическую эффективность эксплуатации проектируемого судна.

Успешное решение основной проектной задачи — определение размеров и форм судна — связано с учетом предшествующего опыта судостроения, заключающегося в использовании данных отдаленного судна-прототипа и статистических данных по ряду построенных судов. Применять эти данные нужно с осторожностью. Прогрессность, например, статистических данных для разработываемого проекта должна оцениваться с точки зрения того, насколько они отражают передаваемую правннку судостроения, машино-

строения и т. д. Данные близкого прототипа более надежны. Однако не все они могут быть использованы при проектировании нового судна. Так, если новое судно имеет то же назначение, что и прототип, но при этом конструктивно установка на нем, в отличие от прототипа, двукрылая, а не паротурбинная, то ряд характеристик судна-прототипа не может быть использован (расход и полезная полезная, удельная масса механизмов, объем машинного отделения и т. д.). Поэтому в некоторых случаях учитываются данные нескольких прототипов.

Для создания проекта, наилучшим образом удовлетворяющего всем заданиям [35], необходимо принимать во внимание не только средние статистические данные, но и отклонения от них [11, 12]. Правильно обработанная статистическая информация дает тем, что, во-первых, дает возможность судить о тенденциях изменения характеристик, а во-вторых — позволяет судить о пределах, в которых колеблются используемые в проектировании величины, и сравнивать принятые значения (например, по данным прототипа) со средними и пределами, встречающимися в мировой практике.

По данным статистики был получен ряд зависимостей, которые применяются в проектировании. Так, Б. Л. Подозани [73] предложил связать длину судна с его скоростью на основании статистических данных [18]. Устанавливая зависимость между характеристиками судна, статистика позволяет судить об изменении некоторых характеристик судна-прототипа при переходе к проектируемому судну. Трудности учета всех требований к судну, влияющих на его размеры, коэффициенты формы и другие характеристики, заставляют применять при проектировании метод последовательных приближений, который английские называют методом проб и ошибок. В нем одна и та же проектная величина получает ряд значений, на последнем из которых останавливается проект. Этот метод должен применяться рационально, чтобы увеличить по возможности число приближений и чтобы окончательная величина была надежно обоснована.

Накапливание информации и ее обработка для использования при проектировании позволяют увеличивать число приближений или даже отказаться от них. Таким образом, чем больше изучена область данных, относящихся к проектируемому судну, тем меньше оказывается число приближений.

Стадии проектирования судов. Процесс проектирования судов разделяется на ряд стадий. Как уже указывалось, проектирование самого судна, т. е. решение внутренней задачи, должно предшествовать решению задачи внешней, которая заключается в определении состава целых флотов с оптимальной этого состава и выполняется разработкой задания на отдельное судно, подлежащее проектированию.

Выработанное задание должно содержать характеристики величин, определяющих основные эксплуатационно-технические свойства судна (фактивно-технические свойства кораблей).

Эти характеристики должны быть без внутренних противоречий, т. е. взаимно совместимыми. Таким образом, разработка задания возможна при таком взаимном исследовательском проектировании, осуществляемом по закономерностям теории проектирования судов, что вызывает необходимость вариативного исследования таких величин (как, например, скорость), которые в данном задании будут уже неизменными либо лишь незначительно корректироваться на последующих этапах проектирования.

В отечественном судостроении приняты нормы, устанавливающие порядок разработки, согласования и утверждения проектной конструкторской документации для постройки гражданских транспортных, исследовательских, промышленных и технических судов, в том числе судов на подводных крыльях (СПК), воздушной подушке (ВВП) и катерах.

Стадиями разработки проекта являются:

- техническое задание;
- техническое предложение — проектная проработка технического задания (ранее называлось предпроектным проектом);
- эскизный проект;
- технический проект.

Техническое задание на проект судна разрабатывается и утверждается ведомством-заказчиком (Министерством Морского флота, Министерством рыбного хозяйства, Министерством речного флота или другим каким-либо ведомством) и содержит следующие данные:

- назначение и тип судна;
- класс судна;
- район, дальность плавания и автономность;
- скорость судна или мощность главного двигателя;
- тип энергетической установки (ЭУ);
- эксплуатационные ограничения главных размеров судна;
- характер груза и требования к грузоподъемности, грузоемкости, пассажироемкости;
- требования к обитаемости;
- специальные требования к разным свойствам судна, устройству, механизмам, системам и т. п.;
- требования к автоматизации управления ЭУ и судном в целом, к средствам связи и навигации;
- состав и численность экипажа.

В техническое задание могут быть включены требования, касающиеся экономических показателей постройки и эксплуатации судна.

Утвержденное техническое задание передается конструкторскому бюро — проекту судна — для разработки на его основании технического предложения. Основа разработки технического предложения — проверка выполнимости и совместности требований технического задания, возможность комплектации судна основными оборудованием, выявление необходимости разработки и освоения новых видов оборудования. В случае необходимости прорабатываются варианты возможных решений. На данной стадии проектирования, называемой мачтовой стадией, значительную

роль играют методы аналитического подхода к определению водонемаска судна, главных размеров и коэффициентов формы корпуса.

На начальной стадии проектирования разрабатывается исходный вариант судна, удовлетворяющий требованиям задания, а затем ряд вариантов по размерениям и коэффициентам формы, которые должны быть оценены по обоснованным критериям. При этом исходный вариант рассматривается как близкий прототип.

Выбором на начальной стадии проектирования решаются задачи, служащие основанием для графической разработки технического предложения, включающей комплект чертежей общего расположения и теоретической чертёж. Полученный комплект чертежей обеспечивает возможность проверки реальности заданных в проект характеристик (по методам, заимствованным из различных кораблестроительных дисциплин).

Техническое предложение на разработку проекта судна после экспертизы, согласования и утверждения ведомством-заказчиком является основой для дальнейшего проектирования судна.

Следующая стадия — доработка исходного проекта, на которой уточняются характеристики судна, его оборудования, требующие более подробной разработки проектных чертежей и расчетов.

После совместного утверждения эскизного проекта ведомством заказчика и строителя начинается разработка технического проекта судна, преследующего цель получения окончательных конструктивных и технологических решений по корпусу, ЭУ, оборудованию судовых помещений, комплексу энергетических установок, устройств и систем и т. п. Разрабатывается принципиальная технология постройки судна на конкретном заводе-строителе и на этой же стадии составляются заказные ведомости на оборудование и материалы.

На третьей стадии — при разработке монтажного проекта — как правило, не должны пересматриваться технические характеристики судна, принятые в эскизном проекте. В нем не должно существенно измениться главные размерения, форма и архитектурно-конструктивный тип судна. Отступление от этого правила ведет к замедлению и удорожанию постройки.

Из материалов утвержденного технического проекта должна комплектоваться документация для заключения договора на постройку судна.

Надо отметить, что проекты гражданских судов проверяются Регистром СССР на соответствие нормам Регистра.

После утверждения технического проекта разрабатывается рабочая конструкторская документация, т. е. комплект чертежей, позволяющих организовать технологический процесс обработки и сборки конструктивных составляющих судна, монтаж его оборудования и весь процесс постройки судна. Создание судна завершается его испытаниями и сдачей заказчику. Эти стадии не относятся к процессу проектирования судна, но обобщенные их результаты представляют исключительно ценный материал для проектирования последующих судов. Так, при сдаче судна могут быть вскрыты некоторые дефекты (недостаточная остойчивость, повышенная вибрация, шумность и т. д.), не выявленные в техническом проекте или при разработке рабочих чертежей.

Многие же недостатки судна, обусловленные иррационально составленными заданиями или неудачно выбранными характеристиками, вскрываются только при эксплуатации. Отсюда вытекает важность рационального подхода к составлению заданий и выбору главных размерений и коэффициентов формы судна, что обеспечивается применением аппарата теории проектирования судов на начальных стадиях проектирования, когда приобретает особое значение анализ задания, а затем выбранных размерений и коэффициентов формы.

НАГРУЗКА СУДНА

1.1. Общие сведения

Водоизмещение судна — важнейшая характеристика его размеров, стоящая во главе иерархии проектных величин, тесно связана с составом его нагрузки, который влияет на многие другие характеристики судна. *Нагрузка* судна называется совокупность всех масс, составляющих его водоизмещение. Ранее применялся термин «веса судна», но в связи с введением системы СИ вместо весов рассматриваются массы, которыми эти веса пропорциональны.

В состав нагрузки входят постоянные и переменные массы. *Постоянные массы*, составляющие водоизмещение порожнего судна, определяют капитальные затраты на постройку и входят на эксплуатационные расходы. К ним относятся: масса корпуса, устройств, систем, энергетической установки, электрооборудования и т. д., т. е. масс, которые практически не меняются в процессе эксплуатации судна. В состав *переменных масс* на транспортных судах входят прежде всего массы перевозимого груза, запасов топлива, питьевой воды и смазочного масла. На кораблях основными переменными массами являются массы боезапаса и топлива с швартельной водой и смазочным маслом.

Одним из важнейших проектных документов является ведомость нагрузки, т. е. перечень всех масс на судне. В начальной стадии проектирования вместо подробной ведомости составляется таблица нагрузки масс, которые относятся на крупные разделы. В ведомости и в таблице фиксируются также координаты центров тяжести (ЦТ) элементов нагрузки (x — по длине судна, y — по ширине, z — по высоте) и соответствующие им моменты (M_x , M_y , M_z).

Координата x указывает отстояние ЦТ соответствующего элемента нагрузки от плоскости шпангоута, проведенного через среднюю расчетную длину судна. В иностранной практике встречается случай, когда координату x отсчитывают от шпангоутной плоскости, расположенной в корме судна. Координаты z и y определяют отстояние ЦТ элемента нагрузки соответственно от основной (ОП) и диаметральной (ДП) плоскостей судна.

Координата y в ряде проектов не вычислялась, однако опыт показал, что это иногда приводило к наличию у судна нежелательного начального крена. Таким образом, эта координата, как и важней-

шие координаты x и z , от которых зависит удифференцовка и остойчивость судна, должна учитываться.

Ниже показана схема записи величин в таблице нагрузки (табл. 1.1).

Таблица 1.1

ТАБЛИЦА НАГРУЗКИ

Код элементов нагрузки	Наименование элементов нагрузки	P, T	Плоски			Моменты			Примечание
			x, м	y, м	z, м	M_x т·м	M_y т·м	M_z т·м	

1.2. Разбивка нагрузки

В разных странах действуют различные системы разбивки нагрузки на ее составляющие. Даже в одной стране эти системы время от времени меняются. Так, у нас за 50 лет системы нагрузки изменялись несколько раз. Все это затрудняет сравнение и анализ нагрузки различных судов.

Далее приведены основные разделы нагрузки для гражданских морских судов. Они обозначаются двузначным цифровым кодом. В таблице указано также, какие разделы входят в обозначенные порожней $D_{\text{порож}}$, а какие в так называемый дефайт DW (табл. 1.2).

Каждый раздел нагрузки состоит из групп (обозначаемых четырехзначным кодом) и подгрупп (обозначаемых шестизначным кодом). Подгруппы включают еще более мелкие составляющие нагрузки — статьи, обозначаемые восьмизначным кодом. Если необходимо разделить статьи на подстатьи, то их обозначают десятизначным кодом.

Следует учесть, что целый ряд самостоятельных разделов в прежних стандартах нагрузки входил в другие разделы. Например, из раздела «Корпус» были выделены сначала разделы «Системы» и «Электроэнергетическая система», а в последнем стандарте — «Устройства судовой». Поэтому при использовании данных судноархива со старой разбивкой нагрузки следует пересмотреть составляющие его нагрузки в соответствии с действующим стандартом.

1.3. Водоизмещение порожнего судна, запас водоизмещения

Постоянные массы, образующие водоизмещение порожнего судна, представляют разделы нагрузки с кодами 01, 02, 03, 04, 05, 07, 09, 10, 11, 12, 13.

В водоизмещение порожней не включается запас водоизмещения $P_{\text{зап}}$. Он учитывается только в процессе проектирования и постройки

Таблица 1.2

РАСЧЕТ СОСТАВЛЯЮЩИХ НАГРУЗКУ СУДА

Характеристика	Виды нагрузки	Код по стандарту	Варианты обозначения		
			в системе	в формулах	
Подъемное оборудование порожней $D_{пор}$	Котел	01	P_{01}	P_{01}	
	Устройство судовой	02	P_{02}	P_{02}	
	Система (судовой)	03	P_{03}	P_{03}	
	Установка энергетическая (механическая)	04	P_{04}	P_{04}	
	Электроэнергетическая система, внутрисудовая связь и управление	05	P_{05}	P_{05}	
	Посудовые (агурманские)	07	P_{07}	P_{07}	
	Запасные части	09	P_{09}	P_{09}	
	Балласт (постоянный жидкий или твердый)	10	P_{10}	P_{10}	
	Запас водонагревателя, осветительные	11	P_{11}	P_{11}	
	Постоянные якорные грузы	12	P_{12}	P_{12}	
	Снабжение, инструмент	13	P_{13}	P_{13}	
	Дедейт DW	Остаток топлива, вода, расходные материалы, расходные якорные грузы	14	P_{14}	P_{14}
		Груз перевозимый (грузоподъемность)	15	P_{15}	P_{15}
Запасы топлива, масла, воды		16	P_{16}	P_{16}	
Переменные якорные грузы		17	P_{17}	P_{17}	
Жидкий балласт		18	P_{18}	P_{18}	

судна и вводятся в нагрузку в целях компенсации превышения нагрузки «перевесами» по отдельным разделам. Эти превышения могут возникнуть в результате использования недостаточно надежных данных, неучета некоторых масс в начальных стадиях проектирования, принятия технических условий, в которых предусмотрены положительные допуски и т. д.

Чем больше опыт накоплен проектной организацией и чем лучше взаимопонимание на заводе-строителе контроль за массой поступающих на судно элементов, тем меньше запас водоизмещения можно принять в таблице нагрузки.

Для построенного судна запас водоизмещения исключается из нагрузки. В результате, если он не использован полностью, может быть уменьшена наибольшая осадка или увеличена масса переменных грузов. В некоторых случаях по требованию заказчика запас водоизмещения оставляется в составе отчетной нагрузки. В этом

случае предполагается использовать этот запас при переоборудовании или модернизации судна.

Запас водоизмещения можно было бы вычислить как сумму положительных вероятных отклонений масс по отдельным разделам нагрузки. Однако он обычно определяется суммарно по накопленным статистическим данным.

1.4. Дедейт

У гражданских судов разность между полным водоизмещением и водоизмещением порожней называется дедейтом: $DW = D_{полн} - D_{пор}$.

Он складывается из полезного груза (грузоподъемности) (англ. термин Paying Deadweight — оплачиваемый дедейт), подъемного перевоза, и прочих переменных грузов. К полезному грузу относятся пассажиры с багажом и необходимые для них запасы воды и провизии.

В состав прочих переменных грузов входят топливо, вода для питания котла, смазочное масло, жидкая вода с багажом, необходимые для него вода и пропанка, расходные материалы (см. табл. 1.2). Отсюда

$$DW = P_{14} + P_{15} + P_{16} + P_{17} + P_{18} = \sum_{i=1}^{n+1} P_i \quad (1.1)$$

По мере расходования топлива или уменьшения массы полезного груза на судно может приниматься соответствующее количество жидкого балласта P_{18} . Жидкий балласт принимается иногда также до выхода в плавание сверх груза, топлива и снабжения для обеспечения мореходных или других качеств судна. При этом он выключается в дедейт (например, на некоторых лесовозах, научно-исследовательских и промысловых судах).

Иногда дедейт рассматривают как наименьшую характеристику нагрузки судна, в то время как его водоизмещение и грузоподъемность не упоминают. Такое внимание к дедейту объясняется в первую очередь тем, что грузоподъемность, если представить ее в запасах топлива как некую общую категорию переменных грузов, в случае укорочения рейса (плеча перевозок) можно увеличить, уменьшив запасы топлива (топливо, при достаточной вместимости грузовых помещений), оставив дедейт неизменным.

Поэтому значение этого взгляда на дедейт при рассмотрении технико-эксплуатационных свойств судна. Однако не следует забывать, что физическая связь многих проектных характеристик судна (размерения, скорость) с дедейтом не так тесна, как их связь с полным водоизмещением, которое является, как уже указывалось, важнейшей проектной характеристикой.

1.5. Виды водозамещения

Во время рейса водозамещения судна увеличивается в основном по мере расходования топлива. Для гражданских, особенно транспортных судов, изменение водозамещения считалось несущественным, так как запасы топлива у них определялись небольшой скоростью и были сравнительно невелики.

В настоящее время в связи с ростом скоростей и появлением высокоскоростных судов с динамическими принципами поддержания (суда на воздушной подушке, суда на подводных крыльках) изменение водозамещения за рейс становится ощутимым и должно учитываться в проектных расчетах. В результате для высокоскоростных судов, во-первых, должно учитываться водозамещение, соответствующее средней скорости судна. Во-вторых, основными видами водозамещения гражданских судов остаются: водозамещение порожнего судна $D_{пор}$; полное водозамещение $D_{полн}$ (или просто D).

Кроме них в расчетах по гражданским судам рассматриваются и другие промежуточные виды водозамещения, позволяющие выявить случаи худшей остойчивости, а также условия непотопляемости судна (табл. 1.3).

Таблица 1.3

ВИДЫ РАСЧЕТНЫХ ВОДОЗАМЕЩЕНИЙ ГРАЖДАНСКИХ СУДОВ (в процентах)

Водозамещение	Виды и стандартные условия загрузки				
	14. «Средняя» группа в т. д.в.	15. «Груз» перевозимый	16. «Средняя» группа в т. д.в.	17. «Перевозимый» грузы	18. «Средняя» группа в т. д.в.
С полным грузом в полном запасе, т. е. $D_{полн}$	100	100	100	По мере надобности	
С полным грузом в 10 % запаса	*	100	10		
Воз. грузы с полным запасом	100	0	100		
Без груза с 10 % запаса	**	0	10		

* Подгружен «Бразил» с Балтикой, код 10 01—10 03.

** Подгружен «Бразил» с Балтикой, код 10 01—10 03.

Учет изменения скорости за время рейса в связи с изменением водозамещения привел вместе с некоторыми другими причинами к тому, что для боевых кораблей рассматривается несколько видов водозамещения:

порожнем $D_{пор}$; стандартном $D_{ст}$, в которое в отличие от водозамещения порожнем включены массы по разделам «Боезапас» ($P_{б.з.}$) и «Снабжение,

жизня и провизия» ($P_{ж.п.}$). Это водозамещение стало фигурировать в практике мирового кораблестроения после Вашингтонской конференции 1922 г. по ограничению морских вооружений. Цель его введения — исключить влияние запаса топлива на сравнительные оценки водозамещения [19];

полном $D_{полн}$, значительное так же, как для гражданских судов;

нормальное $D_{норм}$ (водозамещение при официальных испытаниях). Оно отличается от стандартного водозамещения тем, что в него включается 50 % запаса топлива, питательной воды и смазочных материалов, соответствующего гарантированной дальности плавания r (рис. 1.1);

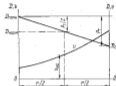


Рис. 1.1. Изменение водозамещения в скорости судна при расходование топлива. $t_{ст}$ — скорость судна на испытаниях.

наибольшее $D_{полн}$, когда топливо, питательную воду и смазочное масло принимают во все пригодные цистерны в количестве, превышающем их запас при полном водозамещении. Естественно, что при избыточном водозамещении корабль обладает наименьшим запасом плавучести и, как правило, худшими мореходными качествами*. Возможность загрузки боевых кораблей дополнительно сверх полного водозамещения объясняется тем, что у них в регламентирован строго минимальный надводный борт. Заметим, что перегрузка сверх полного водозамещения возможна также для ограниченного числа гражданских судов, главным образом малых, не подпадающих под Правила о грузовой марке. Перегрузка других судов может возникнуть при каких-либо чрезвычайных обстоятельствах. Для этого случая предусмотрен соответствующий раздел нагрузки «Грузы, снабжение, запасы дополнительные» (код 19): $P_{19} = P_{полн}$.

* Обладаетея пример значительного ухудшения остойчивости броненосцев типа «Клара Суворов», введенных в момент Цусимского боя 27 мая 1905 г. лишнее количество топлива на борту.

1.6. Коэффициенты использования водоизмещения

Коэффициент использования (утилизации) водоизмещения по дедевейту

$$\eta_{DWF} = DW/D_{max} \quad (1.2)$$

Коэффициент использования (утилизации) водоизмещения по чистой грузоподъемности

$$\eta_r = P_r/D_{max} \quad (1.3)$$

Оба коэффициента служат для оценки степени использования водоизмещения транспортного судна по его прямому назначению.

Для грузовых судов η_{DWF} и η_r достигают наибольших значений. Типичные значения их позволяют судно оценить по отношению к водоизмещению судна, которое может определяться по формулам, полученным из (1.2), (1.3):

$$D_{max} = DW/\eta_{DWF} \quad (1.4)$$

$$D_{max} = P_r/\eta_r \quad (1.5)$$

Коэффициенты η_{DWF} и η_r берутся по данным прототипа. Однако результаты определения водоизмещения по формулам (1.4) и (1.5) можно рассматривать только как ориентировочные, поскольку некоторые изменения требований к проектируемому судну, например изменение одной из относительных масс P_i , могут значительно повлиять на η_{DWF} и η_r .

Действительно, из (1.1) и (1.2) следует

$$\eta_{DWF} = \frac{DW}{D_{max}} = \frac{D_{max} - \sum_{i=1}^{m+1} P_i - \sum_{i=1}^{m+1} P_i}{D_{max}} = \frac{P_m}{D_{max}} \quad (1.6)$$

В частности, необходимо учитывать изменение масс $P_m = P_{de}$, которое обычно связано с проектной скоростью и типом ЭУ.

В ряде случаев скорость судна влияет на η_r , значение которого, как следует из (1.1) и (1.3),

$$\eta_r = \frac{D_{max} - \sum_{i=1}^{m+1} P_i - \sum_{i=1}^{m+1} P_i - \sum_{i=1}^{m+1} P_i}{D_{max}} = \frac{P_m + P_{de}}{D_{max}} \quad (1.7)$$

В этом случае скорость и тип ЭУ влияют не только на $P_m = P_{de}$, но и на $P_i = P_{de}$; последнее отношение, кроме того, зависит от принятой дальности плавания L .

Таким образом, к определению D_{max} по формулам (1.4) и (1.5) надо подходить с осторожностью. Особенно значительные ошибки в значение D_{max} могут получиться для судов, которые обладают малым значением η_{DWF} и η_r (например, пассажирские суда, т. е. суда с малой полезной нагрузкой).

Состав нагрузки для судов различных назначений приведен в табл. 1.А.

Таблица 1.А

ХАРАКТЕРНЫЙ СОСТАВ НАГРУЗКИ (ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ МАССЫ) ДЛЯ НЕКОТОРЫХ ВОЗМОЖНЫХ ВИДОВ РАЗНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Назначение судна	Ква и максимальные значения нагрузки, т. Дедвейт						Ис. относительная масса
	Ис. скорость	Ис. водоизмещение судна	Ис. «Свободная масса»	Ис. относительная масса груза	Ис. относительная масса оборудования	Ис. относительная масса плавсредств	
Пассажирское* (включая)	42,00	3,14	2,50	8,62	2,50	2,51	2,00
Судно для перевозки пассажиров (включая)	20,3—22,1	2,2—2,4	0,7—1,7	3,0—7,0	0,6—3,0	—	0,3—1,8
Линейное	22,8—23,2	2,7—2,8	0,8—0,9	2,9—3,8	1,3—1,5	**	0,9—1,4
Кабельное*	27,10	3,00	1,10	4,20	1,50	**	0,80
Навигационное (для перевозки пассажиров)	17,1—25,6	0,7—1,1	0,8—0,7	1,9—1,4	0,30	**	0,4—1,2
Исследовательское	12,9—22,6	0,7—1,2	0,7—2,0	0,9—4,0	0,1—0,6	—	0,3—1,00
Промысловое	34,8—46,6	8,4—12,4	0,8—2,80	4,7—11,30	1,8—2,1	—	1,7—2,90
Военное	22,6—24,2	6,4—8,8	1,6—3,60	10,9—24,7	1,1—2,30	—	1,6—4,0

* Данные по общей массе.

** В brackets даны минимальные и максимальные значения, зависящие от скорости.

Класс и наименование родовой нагрузки, % D_{max}

Наименование груза	Ц, % объем нагрузки судов	К, % объем, связанный с грузом, включая балласт	В, % объем вещи, жидкой или газообразной	Шкала нагрузки судов	Коэффициент эквивалентности вещи, жидкой или газообразной к грузу ψ_1	Коэффициент эквивалентности вещи, жидкой или газообразной к грузу ψ_2
Пассажирские* (включая) Судоустройства общего назначения (генераторный груз)	2,28 0,2—1,0	0,42 0,09—2,82	10,00 2,0—15,0	0,63 0,02—0,30	20,00 45,0—61,0	33,00 50,0—73,0
Лесные	0,7—0,9	0,16—0,76	6,00—8,00	0,05—0,16	57,0—80,0	65,0—68,0
Котельное*	0,69	0,21	6,50	0,20	55,00	62,00
Навалочные (для перевозки мас- совых грузов)	0,2—0,3	0,09—0,8	7,0—10,0	0,024—0,114	60,0—65,0	67,0—75,0
Нефтегазовые	0,4—0,7	0,09—0,81	4,0—9,0	0,02—0,10	50,00—80,00	60,0—84,0
Промышленные	0,6—1,3	2,00—5,00	6,0—16,3	0,21—0,21	1,0—20,0	30,0—47,0
Буковые	0,0—2,2	1,3—4,00	9,0—35,5	0,01—0,77	6,00	11,0—80,0

* Данные по объему груза.

Анализ применимости коэффициентов использования к разным судам может быть сделан путем дифференцирования (1.4) или (1.5) при постоянных P , и DW , например

$$dD_{max} = -\frac{P}{\psi_1^2} d\eta_1 = -\frac{D_{max}}{\psi_1} d\eta_1; \quad \frac{dD_{max}}{D_{max}} = -\frac{d\eta_1}{\psi_1}$$

Если считать, что $d\eta_1 = 0,01$, то для судов, в нагрузку которых доминирует груз, например для судов с $\psi_1 = 0,8$, $\frac{dD_{max}}{D_{max}} = 0,012$;

ψ_1 определяет D_{max} довольно точно. А для судов с малыми значениями ψ_1 точность определения увеличивается. Так, при $\psi_1 = 0,2$ $\frac{dD_{max}}{D_{max}} = 0,05$.

Для кораблей может быть рассмотрен аналогичный коэффициент использования:

$$\eta = \frac{P_{в.} + P_{с.в.}}{D}$$

где D — полное, нормальное или стандартное водоизмещение.

Коэффициент η для военных кораблей мал, поэтому определение по его величине (замещающей у прототипа) водоизмещение получается неточным.

Полезная нагрузка и коэффициенты использования водоизмещения особенно велики у танкеров, так как конструкция у них относительно проста, скорости невелики и основную часть полезного водоизмещения составляет грузоподъемность (или декейт). Несколько меньшие коэффициенты η у сухогрузных судов, масса корпуса которых выше из-за наличия грузовых устройств и в некоторых случаях из-за сравнительной быстротходности этих судов (грузовые быстротходные лайнеры). Особенно велики коэффициенты использования у рефрижераторных судов, в нагрузку которых играют большую роль холодильники, механизмы и системы, связанные с охлаждением груза.

Для ряда буксирных судов понятие коэффициента использования водоизмещения почти теряет смысл, так как их грузоподъемность равна нулю. К полезной нагрузке буксирного судна можно было бы отнести массу его буксирного устройства и массу той части его $ЭВ$, которая обеспечивает ускор гребного винта (главный двигатель, линия вала, гребной винт и т. д.), однако принятие такой подход не получал [93].

ЗАВИСИМОСТЬ МАССЫ ОТДЕЛЬНЫХ РАЗДЕЛОВ НАГРУЗКИ ОТ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СУДНА

2.1. Постановка задачи

Уравнение нагрузки (уравнение массы), которое определяет водоизмещение судна, может быть решено только в том случае, когда будут установлены связи между массой, входящими в нагрузку судна, и его размерами, формой корпуса, требованиями задания к скорости, дальности плавания, количеству пассажиров и т. п., а также нормами, принятыми в судостроении.

И. Г. Бубина говорил, что успешное применение созданного им метода определения главных размерений судна связано в огромной мере от полноты, верности и хорошей обработки тех основных данных протокола, которые получают при постройке и испытании судна. К сожалению, накопление и обработка таких данных у нас только начинаются, и то, что мы имели до сих пор, не может удовлетворить и своим несохлдетельным требованиям. За это мы пока расценивались значительной перегрузкой построенных судов, что будет продолжаться и впредь, пока не будет накоплен и обработан необходимый материал, какой бы метод проектирования мы не употребляли. Ясно, что нельзя придумать метода, который давал бы возможность получать верные результаты, основываясь на неверных данных [3], с. 255—256].

Следует отметить, что советские проектисты накопили значительную информацию о составе нагрузки и зависимости масс, а нее входящих, от характеристик судна. В результате этого применения водоизмещения построенного судна зад проектной величиной его водоизмещения может считаться сейчас исключительным явлением.

Наиболее общая геометрическая характеристика судна — *погруженный объем корпуса судна, или объемное водоизмещение,*

$$V = \lambda L B T, \quad (2.1)$$

где λ — коэффициент выступающих частей (как правило, он меньше 1,01 и уменьшается с увеличением размеров судна); он учитывает наружную обшивку, рули, венты, разные обтекания, а же только те выступающие части, которые учитываются в подгруппе 010106 нагрузки по корпусу шлюза действующей администрации; δ — коэффициент обшивки днища; L, B, T — расчетные главные размеры судна: его длина, ширина и осадка.

Вес судна $D_{\text{вс}} = gD$ и его водоизмещение связаны законом Архимеда:

$$D_{\text{вс}} = gD = \rho_0 V,$$

где ρ_0 — плотность воды.

Переходя к водоизмещению судна D в единицах массы, можно заменить указанное выражение на следующее:

$$D = \rho_0 V = \rho_0 \lambda L B T, \quad (2.2)$$

Значения ρ_0 колеблются от 1,000 до 1,030 т/м³; при проектировании гражданских судов для морской воды обычно принимается $\rho_0 = 1,025$ т/м³.

Выражение (2.2) можно назвать уравнением плавучести.

2.2. Нагрузка по разделу «Корпус»

В раздел нагрузки 01 — «Корпус» — входят группы, замумерованные от 0101 до 0108.

Группу 0101 — корпус металлический — составляет большая часть масс, входящих в раздел 01.

В подгруппы группы 0101 входят: обшивка наружная и настил второго дна, прилегающий к ним набор и другие примыкающие к ним части (подгруппа 010101), палубы и платформы (подгруппа 010102), переборки (подгруппа 010103), надстройки, рубки и мачты (подгруппа 010104), конструкции специальные (подгруппа 010105), в которую входят и газосварные грузоподъемные механизмы, выступающие части (подгруппа 010106), куда включены выступающие части сварных швов и заклепочные головки, т. е. по существу только малая часть тех выступающих частей, которые учитываются коэффициентом λ в формуле (2.1).

Если основной корпус судна изготовляется из неметаллических материалов (дерево, железобетон, пластмасса), то он учитывается тоже по группе 0101.

По группе 0102 учитываются подкрепления и фундаменты; по группе 0103 — дальние вентри; по группе 0104 — неметаллические части судов с металлическим корпусом; по группе 0105 — окраска; по группе 0106 — изоляция и зашивки.

Группа 0107 учитывает массу воздуха, давление которого не уравновешивается давлением внешнего воздуха.

Приблизительная оценка распределения нагрузки по разделу 01 на крупные части для некоторых судов разного назначения дана в табл. 2.1 в процентах от $P_0 = P_{01}$.

Для определения массы корпуса проектируемого судна существует ряд формул, связывающих ее с водоизмещением судна, его главными размерениями, а которые включают высоту борта, и коэффициентом δ .

Таблица 2.1
СОСТАВ РАЗДЕЛА «КОРПУС» ДЛЯ НЕКОТОРЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СУДОВ
(в тоннах P_k)

Судно	Голой корпус	Металлический корпус	Оборудование всплывший
	Група нагрузки		
	081-082	081	086
Пассажирское океанское	97	67	3
Сухогрузное (генеральные грузы)	35-36	77-90	2-5
Нефтяное	98-99	97-98	1-2

Простейшие формулы устанавливают пропорциональную зависимость массы корпуса, голого корпуса $P_{k,г}$ и металлического корпуса $P_{k,м}$ от аддитивности, которое в данном случае фигурирует как так называемый модуль:

$$P_k = P_{0k} = P_{0k} D = P_{0k} D; \quad (2.3)$$

$$P_{k,г} = P_{0k,г} D; \quad (2.4)$$

$$P_{k,м} = P_{0k,м} D; \quad (2.5)$$

где P_{0k} , $P_{0k,г}$, $P_{0k,м}$ — так называемые измерители масс, которые колеблются довольно значительно. Эти безразмерные коэффициенты иногда называют долями.

Одноименные измерители масс (P_{0k} , $P_{0k,г}$ или $P_{0k,м}$) оказываются близкими у двух судов только при незначительных отличиях в их водоизмещении, форме, материале корпуса и архитектурно-конструктивном типе. Поэтому хорошие результаты формулы (2.3), (2.4) и (2.5) дадут только в том случае, если для определения P_{0k} , $P_{0k,г}$ или $P_{0k,м}$ используется близкий прототип. Присвоение стали повышенной сопротивляемости или легких сплавов в качестве материала корпуса ведет к снижению величин P_{0k} , $P_{0k,г}$, $P_{0k,м}$. При росте водоизмещения указанные измерители также уменьшаются.

Поскольку с уменьшением P_{0k} , $P_{0k,г}$, $P_{0k,м}$ при прочих равных условиях уменьшается масса корпуса, а значит и водоизмещение, можно считать, что P_{0k} , $P_{0k,г}$, $P_{0k,м}$ в известной мере характеризует степень прогрессивности проекта. В то же время несомненное снижение этих измерителей указывает на увеличение надежности конструкции корпуса.

Проиллюстрируем это на примере. Сравним два проекта танкера одинаковых размеров и одинакового архитектурно-конструктивного типа, но разных по материалу корпуса и некоторым другим конструкциям (табл. 2.2).

Как показала исследования, нагрузка группы «Оборудование» (0108) довольно точно определяется зависимостью

$$P_{0108} = P_{0108} = P_{0108} D^{0.5}. \quad (2.6)$$

Таблица 2.2
ХАРАКТЕРИСТИКИ НАГРУЗКИ ТАНКЕРА ИЗ СТАЛИ И ИЗ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ

Характеристики судна	Осевой материал конструкции	
	сталь	легкие сплавы
Водоизмещение порожнем $D_{вп}/D$	25,2	15,4
Коэффициент использования металла/стали: по частой грузоподъемности γ по диаметру $\gamma_{0.05}$	66,0	75,8
	74,8	84,0

Измеритель $P_{0108} = 0,06 \pm 0,02$ для сухогрузных судов и $P_{0108} = 0,06 \pm 0,02$ для танкеров.

Формула (2.6) показывает, что рассмотренные категории масс увеличиваются пропорционально поверхностям корпуса судна.

Существует и другой подход к определению массы корпуса, когда за основу вычисления берется кубический модуль LBN . В этом случае получаем

$$P_{0k} = P_{0k} = q_{0k} LBN = q_{0k} LBN; \quad (2.7)$$

$$P_{0k,г} = q_{0k,г} LBN; \quad (2.8)$$

$$P_{0k,м} = q_{0k,м} LBN; \quad (2.9)$$

$$P_{0108} = P_{0108} = q_{0108} (LBN)^{0.5}. \quad (2.10)$$

Сопоставляя эти формулы с формулами (2.3) — (2.5), получаем, например, для $P_{0108} = P_{0108}$

$$P_{0108} D = q_{0108} LBN; \quad (2.11)$$

$$P_{0108} \delta LBN = q_{0108} LBN \quad \text{и}$$

$$P_{0108} = \frac{q_{0108}}{\delta \delta} \frac{H}{T}. \quad (2.12)$$

Формула (2.12) определяет взаимосвязь между измерителями масс в формулах пересчета через кубический модуль и водоизмещение.

С целью уточнения расчета массы корпуса делались попытки введения в формулу (2.7) дополнительных членов, учитывающих влияние коэффициента δ и отношения H/T . Такая формула для нахождения массы «Металлического корпуса» по Арнотту имеет вид [17.5]

$$P_{0k,м} = q_{0k,м} LBN (\delta + a) (L/N)^{1.2} \quad (2.13)$$

при $a = 2$.

По В. М. Векслеру [33] $a = 0,8 \pm 1,3$ (для танкеров). Среднее значение $a = 1,05$. В свою очередь величина $(\delta + 1,05)$ при $\delta = 0,5 \pm 0,85$ может быть заменена с относительной погрешностью не более 1,5 % одночленным выражением $1,98 \delta^{0.15}$.

После подстановки его в зависимость (2.13) получим

$$P_{к.к} = 1,56 q_{к.к} \delta^{10} L^6 B H (L/H)^{12} \quad (2.14)$$

или

$$P_{к.к} = q_{к.к} \delta^{10} L^{22} B H^{12} \quad (2.15)$$

Формула, очень близкая к (2.15), была получена Л. М. Носовым в результате статистического обследования нагрузок ряда транспортных судов [62].

Другая статистическая формула, полученная Л. М. Носовым, имеет в отличие от (2.15) иные показатели степени при L и B :

$$P_{к.к} = q_{к.к} \delta^{13} L^{15} B^{24} H^{12} \quad (2.16)$$

Зависимости (2.14), (2.15), (2.16) должны давать лучшие результаты, чем простейшие формулы (2.5), (2.9), (2.10). Но при значительных отличиях в задании на проект по сравнению с данными судна-прототипа часто целесообразнее именно простейшие формулы.

2.3. Постоянный расчет нагрузки по разделу «Корпус»

В целях расширения области использования данных прототипа при переносе к проекту или даже отказе от использования прототипа некоторые авторы (Рагстер, Пухштейн и др.) предлагают заменить формулы графиками. Однако применение графиков большого распространения не получило, поскольку в современных условиях в распоряжении проектировщика имеется достаточно большое количество данных по прототипу и, кроме того, очевидно стремление к выражению зависимостей, используемых в теории проектирования, в виде формул.

И. Г. Бубнов в целях увеличения точности расчета масс предложил пересчитать нагрузку судна-прототипа применительно к проектируемому судну постоянно, рассматривая отдельные разделы и группы нагрузки, для которых может быть найдена более или менее надежная зависимость [31]. Такую группу могут составлять, в частности, массы продольных связей корпуса судна, входящих в эквивалентный брус.

Момент сопротивления эквивалентного бруса

$$W = \frac{3}{2} H \Omega, \quad (2.17)$$

где η — коэффициент утолщения профиля; для идеального профиля $\eta = 1$ (рис. 2.1); H — высота эквивалентного бруса, принимаемая равной полной высоте борта; Ω — площадь поперечного сечения эквивалентного бруса.

Для поперечного сечения эквивалентного бруса $\eta = 0,45 \div 0,60$, причем наибольшие значения соответствуют судам большой длины. Нагибающий момент при постановке судна на волну

$$M = \frac{gDL}{K}, \quad (2.18)$$

где K — коэффициент изгибающего момента; g — ускорение свободного падения.

Масса продольных связей судна

$$P_{с.к} = \rho_{с.к} \Omega L,$$

где $\rho_{с.к}$ — плотность материала корпуса; c — коэффициент, учитывающий уменьшение площади сечения эквивалентного бруса по

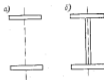


Рис. 2.1. Двутавровый профиль: а — идеализованный; б — реальный, соответствующий эквивалентному брусу корпуса судна.

длине судна (c зависит от формы судна и является функцией δ). И. Г. Бубнов принимал $c = 0,83$; можно считать $c = \delta^{10}$.

На основании сказанного с учетом (2.17), (2.18), (2.1) и (2.2)

$$\sigma_{доп} = \frac{M}{W} = \frac{2gDL}{\eta KH \Omega};$$

$$\Omega = \frac{2gDL}{\eta \sigma_{доп} KH};$$

$$P_{с.к} = \frac{2g \eta c \delta}{\eta \sigma_{доп} K} \frac{\delta^{10} L^6 B T}{H}, \quad (2.19)$$

где $\sigma_{доп}$ — допускаемые напряжения в крайних связях эквивалентного бруса.

Если бы коэффициенты η и K не зависели от L , то масса продольных связей увеличилась бы пропорционально третьей степени длины. Такое предположение привело И. Г. Бубнова к выводу об ограничении длины судна при $\sigma_{доп} = 96,1$ МПа (1000 кгс/см²) величиной $L = 187$ м [30]. Однако в действительности η и K растут с увеличением длины. Так, Л. М. Носов считал, что для транспортных судов $\eta = 0,05 L^{1/5}$.

Значение K в формуле (2.19) из-за уменьшения отношения высоты волны к ее длине также увеличивается с ростом длины судна.

Таким образом, степень, в которую возводится L в формуле (2.13), меньше трех.

Оценочная формула для приблизительного определения массы проплавленных связей будет

$$P_{\text{св}} = P_{\text{с}} \frac{P_{\text{с}}}{\sigma_{\text{св}}} \delta^{\alpha} L^{\beta} B \frac{T}{H}, \quad (2.20)$$

где $\alpha < 3$.

В разных случаях приемлемые результаты получаются при $\alpha = 2,75 \pm 0,25$.

Формула (2.20) типична для постоянной пересчета нагрузки пропеллера для проектируемого судна или перехода от судна определенных размеров с заданным коэффициентом обшивки к судну других размеров и с другим коэффициентом полноты. Конечно, такой переход неидеален, если архитектурно-конструктивной тип судна и его назначение изменится, так же как и предъявляемые к нему требования.

В формулу (2.20) входят два параметра: $P_{\text{с}} \cdot \delta$ и $\rho_{\text{с}} \delta^{\alpha} / \sigma_{\text{св}}$, а также модуль $\delta^{\alpha} L^{\beta} B$ (Т/Н), зависящий от размеров и формы судна.

Разбивая нагрузку на группы, для которых могут быть определены модули, можно пересчитать нагрузку по корпусу, а также по другим разделам с одного судна на другое*.

Подобный метод пересчета масс предложил И. Г. Бубнов [31]. А. И. Балкашин получил ряд модулей для масс по отдельным частям нагрузки [22]. В ряде случаев этот метод дает хорошие результаты. Однако высказывались сомнения в правильности именованных модулей, которые служат для пересчета масс. В защиту постоянного пересчета можно сказать, что, поскольку в модулях, относящихся к разным степеням нагрузки, погрешности и силу их случайного происхождения имеют разные знаки, результат пересчета оказывается надежным, хотя массы по отдельным частям откладываются от окончательных масс уже выполненных конструкций.

В. Л. Полюшин высказал сожаление о том, что модули в формулах типа (2.15) получены не путем исследования систематического ряда корпусов, набор которых производится по правилам классификационного общества [15]. Он указал также на то, что, если выбрать корпус по правилам для ряда судов с последовательно меняющимися размерениями, то можно получить надежные модули и затем рассчитать массы, пользуясь, во существу, интерполяционными данными, которые надежнее экстраполяционных данных.

Работа, связанная с определением масс ряда универсальных сухогрузных судов (суда для генерального груза) с систематически изменяющимися размерениями, была выполнена на кораблестроительном факультете Ростовского университета [96]. Закономерности

были представлены в виде графиков, которые позволили кафедре проектирования судов ЛКИ с учетом кафедры высшей математики этого же института получить модули для степеней нагрузки сухогрузного судна [15]. На основании ряда соображений в модули был введен коэффициент обшивки полноты.

Ниже приводятся модули пересчета (табл. 2.3—2.5). Табл. 2.3 составлена в соответствии с разбивкой на группы (статии) по раздому «Корпус», предусматривающей в качестве основной статьи пересчета продольные связи, модуль для которых определен формулой (2.20). Так как в эквивалентный брус входит обшивка борта и днища, масса поперечного набора, связанного с этими конструкциями, включается в ту же статью. Эту таблицу целесообразно использовать для расчета нагрузки корпусом, набираемых по данным расчета. Табл. 2.4 отвечает разбивке, приведенной в работе [15], и пригодна главным образом для определения нагрузки транспортных судов, корпус которых набирается по правилам классификационных обществ.

Таблица 2.3
МОДУЛИ ДЛЯ ПЕРЕСЧЕТА МАССЫ КОРПУСА $P_{\text{с}}$ ПО ОТДЕЛЬНЫМ СОСТАВЛЯЮЩИМ

Конструкция	Расчетная формула	Примечания
Продольные связи (включая нагрузку обшивку, зрельный, поперечный набор и т. д.)	$P_{\text{с}} \cdot \delta = \rho_{\text{с}} \delta^{\alpha} L^{\beta} B$ (Т/Н)	$P_{\text{с}} = P_{\text{с}} \delta^{\alpha} / \sigma_{\text{св}}$ (см. формулу (2.20))
Поперечные переборки Местные переборки, перегородки, перегородки в основном корпусе	$P_{\text{пер}} = \rho_{\text{ст}} \delta_{\text{пер}} L B H^{\alpha}$ $P_{\text{мест}} = \rho_{\text{ст}} \delta_{\text{мест}} L B H$	$\alpha = 1,5-2,0$ $\delta_{\text{пер}} \rightarrow$ часто переборки
Надстройки и рубки	$P_{\text{надр}} = \rho_{\text{ст}} V_{\text{надр}}$	$V_{\text{надр}}$ — суммарный объем надстроек и рубок
Оборудование Прочие части корпуса	$P_{\text{об}} = \rho_{\text{ст}} \delta_{\text{об}} B H L^{\beta}$ $P_{\text{пр}} = \rho_{\text{ст}} V$	Зависит от массы борта (входит по соображениям, связанным с характером перепада от пропеллера к прогону, пример разбивки LBN)

Из табл. 2.4 видно, что можно разбить нагрузку по корпусу на несколько групп и подсчитать его массу по формуле

$$P_{\text{св}} = P_{\text{с}} = \rho_{\text{с}} \delta^{\alpha} L^{\beta} B \frac{T}{H} + \rho_{\text{ст}} \delta_{\text{пер}} B H^{\alpha} + \rho_{\text{ст}} \delta_{\text{мест}} L B H + \rho_{\text{ст}} V_{\text{надр}} + \rho_{\text{ст}} (\delta_{\text{об}} B H L^{\beta}) + \rho_{\text{ст}} V \quad (2.21)$$

* Такой пересчет позволяет ответить на вопрос, какова будет масса планируемого судна, имеющего данные размеры и форму, но не гарантирует равенство веса судна и силы поддержания при заданной осадке.

КОЭФФИЦИЕНТЫ И ИЗМЕРИТЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА МНОСОВ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КОРПУСА ПО ОТДЕЛЬНЫМ СТАТЬЯМ НАГРУЗКИ

Конструкция	Формулы для расчета мгново	Измеритель мгново
Гладкие пилы: $L_1 = 60-90$ м $L_2 = 90-160$ м	$R_{10} = R_{10} K_1 K_2$ $R_{10} = R_{10} K_1 K_2 + 1,25 \mu$ (0,4-0,16); $3M$ (0,4-0,16) $1,25 \mu$ (0,4-0,16) $0,125 \mu$ (0,4-0,16); где $2L_1$ — суммарная длина пил	$R_{10} = 8 \cdot 10^{-4}$; $R_{10} = 40 \cdot 10^{-4}$
Пирая промежуточная катушка ($L = 90-160$ м)	$R_{10} = R_{10} A^{1/2} B^{1/2} C^{1/2} D^{1/2}$	$R_{10} = 1,70 \cdot 10^{-4}$
Вторая промежуточная катушка ($L = 60-160$ м)	$R_{10} = R_{10} A^{1/2} B^{1/2} C^{1/2} D^{1/2}$	$R_{10} = 0,265 \cdot 10^{-4}$
Нагрузка обмотки	$R_{10} = R_{10} (1,25 - 0,116 \mu \mu^{1/2}) \mu^{1/2}$, где μ — число пилот; $A = L$ (0,75 + + $0,5 \mu$) — поперечность катушечной обмотки	$R_{10} = 1,80 \cdot 10^{-4}$
Второе дно с экранирующей обмоткой	$R_{10} = R_{10} A^{1/2} B^{1/2} C^{1/2} D^{1/2} E^{1/2}$ (0,75, 0,75, 0,75), где: $A_{10} = 0,15 (0,75)^{1/2}$ — поперечность мгново дна для по преобладающей нагрузки Бергана; $A = 10$ — по высоте до дна катушки	$R_{10} = 0,27 \cdot 10^{-4}$

Конструкция	Формулы для расчета мгново	Измеритель мгново
Полосчатые переборки: одноплоскостные ступи $L = 5-7$ м $H = 7-11$ м двухплоскостные ступи $L = 5-9,5$ м $H = 9,5-17$ м трехплоскостные ступи $H = 11-19$ м	$R_{10} = R_{10} A^{1/2} B^{1/2} C^{1/2} D^{1/2}$ $R_{10} = R_{10} A^{1/2} B^{1/2} C^{1/2} D^{1/2}$ $R_{10} = R_{10} A^{1/2} B^{1/2} C^{1/2} D^{1/2}$ $R_{10} = R_{10} A^{1/2} B^{1/2} C^{1/2} D^{1/2}$ $R_{10} = R_{10} A^{1/2} B^{1/2} C^{1/2} D^{1/2}$, где H — высота переборки	$R_{10} = 3,6 \cdot 10^{-4}$ $R_{10} = 0,69 \cdot 10^{-4}$ $R_{10} = 3,10 \cdot 10^{-4}$ $R_{10} = 0,47 \cdot 10^{-4}$ $R_{10} = 0,76 \cdot 10^{-4}$
Продольные переборки: одноплоскостные ступи $L = 60-90$ м двухплоскостные ступи $L = 90-110$ м $L = 110-160$ м трехплоскостные ступи $L = 130-160$ м	$R_{10} = R_{10} A^{1/2} B^{1/2} C^{1/2} D^{1/2}$ $R_{10} = R_{10} A^{1/2} B^{1/2} C^{1/2} D^{1/2}$ $R_{10} = R_{10} A^{1/2} B^{1/2} C^{1/2} D^{1/2}$ $R_{10} = R_{10} A^{1/2} B^{1/2} C^{1/2} D^{1/2}$ $R_{10} = R_{10} A^{1/2} B^{1/2} C^{1/2} D^{1/2}$ где H — высота продольных переборки в данн катушки ступи	$R_{10} = 0,65 \cdot 10^{-4}$ $R_{10} = 54 \cdot 10^{-4}$ $R_{10} = 0,41 \cdot 10^{-4}$ $R_{10} = 0,37 \cdot 10^{-4}$
Длина подвесного бумажного мгново мот- рала по сравнению с мгново мотрала для ла- ды (моторостроитель)	$R_{10} = R_{10} A^{1/2}$	$R_{10} = 3 \cdot 10^{-4}$ (для лады) $R_{10} = 5 \cdot 10^{-4}$ (для моторостроитель) $R_{10} = 0,37 \cdot 10^{-4}$ (для лады)

МОДУЛИ И ЗАМЕРИТЕЛЬНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ПО КОРПУСУ, ПОЛУЧЕННЫЕ СТАТИСТИЧЕСКИМ ИССЛЕДОВАНИЕМ

Конструкция	Формулы для расчета модуля	Измерительные модули
Местные конструкции основного корпуса (шпангоуты, вертикали, шпангоуты, створы, переборки, переборки, переборки)	$R_{\text{мк}} = R_{\text{мк}} \cdot L^{0,75}$ при длине расслоения 90; $L = 90-160$ м при длине расслоения 90; $L = 90-160$ м	$R_{\text{мк}} = 0,207 \cdot 10^{-4}$ $R_{\text{мк}} = 0,220 \cdot 10^{-4}$ $R_{\text{мк}} = 0,238 \cdot 10^{-4}$ $R_{\text{мк}} = 0,237 \cdot 10^{-4}$
Максимальная	$R_{\text{мк}} = R_{\text{мк}} \cdot L^{0,75} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3$ где f_1 — отношение суммарной длины расслоения к длине расслоения; $f_2 = 0,9$; $f_3 = 0,9$ $f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 = 0,18$; $f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 = 0,18$	$R_{\text{мк}} = 29,4 \cdot 10^{-4}$ $R_{\text{мк}} = 17,5 \cdot 10^{-4}$
Рубки	$R_{\text{р}} = R_{\text{р}} \cdot L^{0,75} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3$ где f_1 — отношение суммарной длины рубок к длине рубки; $f_2 = 0,9$; $f_3 = 0,9$ $f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 = 0,18$; $f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 = 0,18$	$R_{\text{р}} = 23,9 \cdot 10^{-4}$ $R_{\text{р}} = 12,3 \cdot 10^{-4}$

Наименование статьи корпуса	Формулы
Металлический корпус в составе комбинированного бруса	$R_{\text{мк}} = \frac{3,12 \cdot L^{0,75} \cdot \sigma_{\text{мк}}^{0,75}}{\sigma_{\text{мк}} \cdot H/T}$ $\sigma_{\text{мк}} \leq 3000 \text{ кг/см}^2$, или $294,3 \text{ МПа}$ $R_{\text{мк}} = \frac{0,29}{\sigma_{\text{мк}}^{0,75}} \left(1 + \frac{2,80}{\sigma_{\text{мк}}^{0,75}} \right) \frac{L^{0,75} \cdot \sigma_{\text{мк}}^{0,75}}{H/T}$ $\sigma_{\text{мк}} > 3000 \text{ кг/см}^2$, или $294,3 \text{ МПа}$
Переборки поперечные	$R_{\text{п}} = (4,61 \pm 0,03) \cdot 10^{-4} \cdot \sigma_{\text{п}} \cdot L^{0,75}$
Максимальная в газоподне	$R_{\text{п}} = 0,022 \cdot \sigma_{\text{п}}$ при $L < 80$ м
	$R_{\text{п}} = (0,021 - 7,62) \cdot \sigma_{\text{п}}$ при $L > 80$ м
Секстиности	$R_{\text{с}} = (4,89 \pm 0,90) \cdot 10^{-4} \cdot L \cdot \sigma_{\text{с}}$
Палубы бака и юта	$R_{\text{п}} = (0,2, 8 \pm 0,6) \cdot 10^{-4} \cdot L \cdot \sigma_{\text{п}}$ $f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 = 0,3$ $R_{\text{п}} = (12,4 \pm 4,8) \cdot 10^{-4} \cdot L \cdot \sigma_{\text{п}}$ $f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 < 0,3$
Местные конструкции: листовые и комбинированные створчатые суда	$R_{\text{м}} = (12,8 \pm 2,6) \cdot 10^{-4} \cdot L \cdot \sigma_{\text{м}}$
комбинированные суда и суда смешанного плавания	$R_{\text{м}} = (8,46 \pm 1,06) \cdot 10^{-4} \cdot L \cdot \sigma_{\text{м}}$ $R_{\text{м}} = (8,28 \pm 0,37) \cdot 10^{-4} \cdot L \cdot \sigma_{\text{м}}$
Литые подкрепления: обычные	$R_{\text{л}} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot L^2$
усиленные	$R_{\text{л}} = 8 \cdot 10^{-4} \cdot L^2$
Фундаменты и подкрепления	$R_{\text{ф}} = (2,25 \pm 1,54) \cdot 10^{-4} \cdot L \cdot \sigma_{\text{ф}}$
Дельные суда: суда старой постройки	$R_{\text{д}} = (0,338 \pm 0,04) \cdot (L \cdot \sigma_{\text{д}})^{0,75}$ $R_{\text{д}} = (0,105 \pm 0,067) \cdot (L \cdot \sigma_{\text{д}})^{0,75}$
Неметаллические части корпуса: листовые, комбинированные створчатые суда	$R_{\text{н}} = (0,225 \pm 0,029) \cdot (L \cdot \sigma_{\text{н}})^{0,75}$
некоторые »	$R_{\text{н}} = (0,118 \pm 0,022) \cdot (L \cdot \sigma_{\text{н}})^{0,75}$ $R_{\text{н}} = (0,020 \pm 0,012) \cdot (L \cdot \sigma_{\text{н}})^{0,75}$
Окраска и пропитки	$R_{\text{о}} = (0,0425 \pm 0,009) \cdot (L \cdot \sigma_{\text{о}})^{0,75}$
Накладки	$R_{\text{н}} = (0,136 \pm 0,022) \cdot (L \cdot \sigma_{\text{н}})^{0,75}$
Прокладки	$R_{\text{п}} = (2,75 \pm 0,71) \cdot 10^{-4} \cdot L \cdot \sigma_{\text{п}}$
Водух в корпусе	$R_{\text{в}} = (9,3 \pm 3,5) \cdot 10^{-4} \cdot D$
Образованные полостями: суда с высокой степенью комфорта	$R_{\text{о}} = (0,80 \pm 0,25) \cdot \sigma_{\text{о}}$
объемные створчатые суда	$R_{\text{о}} = (1,26 \pm 0,47) \cdot \sigma_{\text{о}}$
несквозные суда	$R_{\text{о}} = 0,25 \cdot \sigma_{\text{о}}$

где P_1 , P_2 и T , д. — измерители, относящиеся к грузной масс, являющимся одинаковыми модули.

Модули табл. 2.4 служат для расчетов нагрузки прототипа. Для более грубых подсчетов без прототипа могут быть использованы измерители, приведенные в табл. 2.4 и полученные на основе анализа работы [95]. Эти измерители относятся к сухогрузным судам, набранкам по Правилам Норвежского Веритас; главные размеры этих судов и их соотношения находятся в пределах: $L = 60 \div 160$ м; $L/B = 6 \div 8$; $L/H = 11 \div 13$; $T/H = 0,8 \div 0,8$.

При использовании нагрузки прототипа следует убедиться, соответствует ли исходная конструкция правилам классификационных обществ или расчетным нормам (в зависимости от того, что было положено в основу при конструировании корпуса).

Позже была разработана еще одна табл. 2.5. Ее измерители и модули получены на основе статистической обработки данных ряда судов, в том числе универсальных сухогрузных судов, контейнеровозов, лесовозов и судов смешанного плавания [11, 12].

Возможны случаи, когда при наборе корпуса по правилам классификационных обществ из-за отсутствия в момент разработки чертежа конструкции материала нужных толщин его заменил материал большей толщины и, следовательно, большей массы. При проектировании конструкций по расчетным данным в ряде случаев закладываются эмпирические коэффициенты использования материала. Невыгодный учет таких конструкций прототипа может привести к завышению масс проектируемого судна.

При желании применить материал с измененными характеристиками (например, стеклопластик вместо неизолированной стали) следует создать промежуточный прототип. Для этой цели надо, не меняя размеры, архитектурно-конструктивный тип, форму судна-прототипа, заменить материал его корпуса и рассчитать новые размеры связей. Подсчетная масса новых конструкций прототипа и определены их измерители, следует принять последние для проектируемого судна и с помощью модулей перейти от масс промежуточного прототипа к массам, составляющим нагрузку проектируемого судна.

2.4. Нагрузки по разделам «Устройства судовые» и «Системы»

Разделы «Устройства судовые» (02) и «Системы» (03) были выделены из раздела «Корпус» (04) сравнительно недавно. Дело в том, что их самостоятельность, техническая и организационная, во время росла, росло и их относительное значение в нагрузке судна. Однако их возрастание массы (см. табл. 1.3) все же относительно не очень велико. Поэтому допустимо применение для определения нагрузки по этим разделам простейших формул. При наличии блес-

кото прототипа можно применять формулы

$$P_y = P_{0y} + \rho_{0y} D; \quad (2.23)$$

$$P_T = P_{0T} + q_{0T} L B H \quad (2.24)$$

$$P_c = P_{0c} + \rho_{0c} D; \quad (2.24)$$

$$P_s = P_{0s} + q_{0s} L B H. \quad (2.25)$$

Если в задании на проектирование требуется введение новых систем или устройств (например, поддувающего устройства или системы кондиционирования), то надо исправить P_{0y} или P_{0T} прототипа, определить для них новые значения ρ_{0y} или P_{0T} (q_{0y} или q_{0T}) и использовать их в расчетах по проекту.

Если проектируемое судно, возможно, будет значительно больше, чем прототип, то следует принять модуль, при котором массы должны быть в том же отношении. Тогда расчетные формулы будут иметь вид

$$P_y = P_{0y} + \rho_{0y} D^{2.5}; \quad (2.26)$$

$$P_T = P_{0T} + q_{0T} (L B H)^{2.5}; \quad (2.27)$$

$$P_c = P_{0c} + \rho_{0c} D^{2.5}; \quad (2.28)$$

$$P_s = P_{0s} + q_{0s} (L B H)^{2.5}. \quad (2.29)$$

Значения модулей для формул (2.26) и (2.28), применяемых при расчете нагрузки по данным разделам основных типов транспортных судов, можно выбрать из табл. 2.6.

ЗНАЧЕНИЕ МОДУЛЕЙ В (2.26) И (2.28)

Т а б л и ц а 2.6

Судно	Модуль	
	ρ_{0y}	ρ_{0c}
Сухогрузное	0,43 ± 0,06	0,21 ± 0,04
Танкер	0,30 ± 0,03	0,15 ± 0,05

* 02 — раздел нагрузки «Устройства судовые»; 03 — «Системы».

2.5. Раздел нагрузки «Установка энергетическая»

Масса ЭУ судна связывается с ее мощностью зависимостью

$$P_{0y} = P_{0y} + \rho_{0y} N - \rho_{0y} N, \quad (2.30)$$

где $P_{0y} = P_{0y}$ — измеритель массы по разделу нагрузки 04 «Установка энергетическая» (удельная мощность); N — мощность установки, кВт.

Величины $\rho_n = \rho_{0n}$ и N характеризуют полную массу установки, включающей главные двигатели (дизельны внутреннего сгорания (ДВС), турбины паровые (ПТУ) и др.), передачи (редукторы и т. д.), главные котлы (парогенераторы), вспомогательные механизмы машинного (МО) и котельного отделения (КО), расходные дисперсии (не входящие в конструкцию корпуса), площадки и трапы МО, вентиляторы с воздуховодами в МО, трубопроводы, связанные с движением ЭУ, валопроводы и двигатели (винты и т. д.), дистанционное управление ЭУ (табл. 2.7).

Таблица 2.7

ПРИМЕРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ ЭУ СОВРЕМЕННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СУДОВ (В ПРОЦЕНТАХ ОТ ρ_n)

Наименование статьи нагрузки	Судно с ДВС	Судно с ПТУ
Главные двигатели с оборудованием МО	$37,0 \pm 6,0$	$36,5 \pm 1,0$
Парогенераторы (паровые котлы) с оборудованием КО	—	$23,5 \pm 1,0$
Паропроводы	—	$3,5 \pm 0,5$
Трубопроводы	$17,5 \pm 2,5$	$11,5 \pm 0,5$
Независимые вспомогательные механизмы	$16,5 \pm 2,0$	$4,0 \pm 0,5$
Граблия винты и валопроводы	$7,0 \pm 1,0$	$17,0 \pm 1,0$

Измеритель $\rho_n = \rho_{0n}$ зависит от типа и мощности ЭУ, типа судна, числа гребных валов и в какой-то степени характеризует уровень технического совершенства установки. С увеличением мощности значение ρ_n уменьшается.

Для современных установок транспортных судов коэффициент ρ_n в первом приближении может быть определен по следующим формулам:

для паротурбинных установок (ПТУ)

$$\rho_n = \frac{1200 \pm 150}{N^{0,3}}; \quad (2.31)$$

для газотурбинных установок (ГТУ)

$$\rho_n = \frac{700 \pm 40}{N^{0,3}}; \quad (2.32)$$

для установок с маломощными дизелями сварной конструкции с наддувом и прямой передачей на винт

$$\rho_n = \frac{800 \pm 40}{N^{0,3}}; \quad (2.33)$$

причем в случае использования дизелей литых конструкций без наддува значение ρ_n приблизительно в 1,5 раза больше;

для установок с быстроходными дизелями сварной конструкции с редуктором

$$\rho_n = \frac{600 \pm 60}{N^{0,4}}; \quad (2.34)$$

Определение требуемой мощности ЭУ на ранних стадиях проектирования весьма затруднительно. Используя данные прототипа, можно применить формулы типа (см. гл. 9)

$$N = \frac{D^3 v^3}{C}; \quad (2.35)$$

где D — водоизмещение; v — расчетная скорость (относится к тихоходно-технологическим элементам для кораблей или технико-экономическим элементам для гражданских судов), уз для м/с; C — коэффициент, величина которого одинакова для прототипа и проектируемого судна.

Наиболее употребительной формулой такого типа является формула адмиралтейских коэффициентов

$$N = \frac{D^{2,5} v^3}{C}; \quad (2.36)$$

где C — адмиралтейский коэффициент.

Пределы изменения этого коэффициента довольно широки. Делаясь попыткой получить формулы типа (2.35) с более устойчивым значением C . К таким формулам относится, например, зависимость

$$N = \frac{D^{2,5} v^{2,5}}{C_1}; \quad (2.37)$$

действительная для широкого диапазона расчетных скоростей (до 30 уз) гражданских судов [20].

Обработывая данные испытаний ряда транспортных судов, В. В. Давыдов вывел формулу:

$$N = \frac{D^{2,5} v^{2,8}}{C_2}; \quad (2.38)$$

Подробные сведения о таких формулах и их применении — см. ниже в гл. 9.

В формулах (2.37) и (2.38) наиболее точно значения C_1 и C_2 определяются по прототипу, особенно при близости его размеров и числа Фруда проектируемому. Еще в большей степени должны быть близки размеры, форма и числа Фруда проектируемого судна и судна-прототипа при использовании формулы адмиралтейских коэффициентов (2.36).

После определения водоизмещения, разветрений и коэффициентов формы проектируемого судна необходимо проверить полученную на ранней стадии проектирования мощность ЭУ более точными способами. При этом не следует забывать, что практически лишь как исключение можно принимать для ЭУ ту мощность, которая

получена растением, вольную двигателя следует, как правило, выбирать из серийных, выпускаемых машиностроительными заводами. Мощность и частота вращения таких механизмов изменяются скачкообразно, образуя дискретные ряды.

Данные характеристик большого количества современных двигателей содержатся в работах [26, 29, 48].

Вопрос о скорости, лежащей в основе определения мощности ЭУ, является также важным. Обычно расчетной скоростью, по которой определяются мощность и масса ЭУ, является скорость на стандартных испытаниях (см. гл. 9).

2.6. Нагрузки по разделам «Электроэнергетическая система, внутрисудовые связи и управление», «Вооружение»

Раздел «Электроэнергетическая система, внутрисудовые связи и управление» (05) включает массы источников энергии — генераторов (с их двигателями), преобразователей, трансформаторов, аккумуляторных батарей, электродвигателей и других распределительных устройств, кабелей, системы электрического отопления, электрического автоматического управления ЭУ и т. д., внутрисудовые связи и управление.

При однократных требованиях к использованию электроэнергии на судне-прототипе и проектируемом судне можно принимать

$$P_{05} = P_5 = \rho_{05} D = \rho_5 D \quad (2.39)$$

и

$$P_{05} = P_5 = q_{05} L B H = q_5 L B H \quad (2.40)$$

и даже

$$P_{05} = P_5 = \rho_{05}' D^{2/3} = \rho_5' D^{2/3} \quad (2.41)$$

и

$$P_{05} = P_5 = q_{05}' (L B H)^{2/3} = q_5' (L B H)^{2/3} \quad (2.42)$$

Измерители $\rho_{05} = \rho_5$ и $q_{05} = q_5$ оказываются в этом случае более стабильными, чем измерители $\rho_{05}' = \rho_5'$ и $q_{05}' = q_5'$, которые уменьшаются с увеличением водоизмещения судна.

Для судорожных судов $\rho_{05}' = \rho_{05} = 0,23 \pm 0,05$; для танкеров $\rho_{05}' = \rho_{05} = 0,07 \pm 0,01$.

При использовании значений нагрузок судов старых проектов надо учитывать, что раздел 05 нагрузки был, как и разделы 02, 03, частью раздела «Корпус».

В настоящее время раздел нагрузки «Вооружение» (07) приобретает для гражданских судов все большее значение в результате использования на многих из них авиационного вооружения (например, самолетов и вертолетов для ледовой разведки на судах арктического и антарктического плавания), гидроакустических станций (на промысловых судах для разведки шельфовых рыб).

Для гражданских судов нагрузка масс по разделу 07 определяется так же, как и для кораблей: по номенклатуре и количеству предметов вооружения. У кораблей в раздел «Вооружение» входят массы средств, непосредственно воздействующих на противника, систем, обеспечивающих действие этих средств (систем управления стрельбой с обслуживающими их радиолокационными и гидролокационными станциями), а также массы средств внешней связи и навигационного оборудования.

Массы ракетного, ствольного (артиллерийского), авиационного и другого вооружения определяются по техническим заданиям заказчика, определяющим номенклатуру и количество этого вооружения.

У гражданских судов без авиационного вооружения доля раздела «Вооружение» в нагрузке весьма невелика. На начальных стадиях проектирования его можно принимать либо в абсолютных числах по близкому прототипу, либо пересчитывать пропорционально D . По разделу 07 «Вооружение» учитываются также измерительные комплексы научно-исследовательских судов (масса $P_{07(из)}$).

2.7. Нагрузки по разделам «Запасные части», «Снабжение и имущество»

В раздел «Запасные части» (08) в стандарте нагрузки 1976 г. впервые выделены запасные части самого различного назначения. При этом сами механизмы, устройства, трубопроводы и другое, для которых нужны эти запасные части, учитываются по иным разделам нагрузки.

Причиной выделения запасных частей в самостоятельный раздел стало стремление выделить стоимость их из общей стоимости судна, масса таким образом являлась в зависимости стоимости запасных частей от объема их поставки, который часто является предметом спора между заказчиком и исполнителем.

Нагрузки по разделу «Снабжение и имущество» (13) столь же разнообразны по составу, как и по разделу 06. Причины его выделения аналогичны выделенным.

Нагрузки масс по этим разделам невелики, поэтому на определение водоизмещения они влияют незначительно.

2.8. Разделы нагрузки «Балласт» и «Постоянные надстройки и грузы»

Раздел «Балласт» (10) содержит массу P_{10} или P_6 только того балласта, который принимается как вспомогательная часть водоизмещения, т. е. входит в водоизмещение корабельного судна $D_{кор}$. Этот раздел состоит из двух групп: «Твердый балласт» (1001) и «Постоянный жидкий балласт» (1002). Обе эти группы балласта служат для придания судну нужной остойчивости или посадки, когда вальза

этого добиться другими средствами. Обычно плавная осойчивость и посадка судна обеспечиваются правильным выбором главных размеров и коэффициентов формы судна, а также рациональным распределением нагрузки судна по его длине и высоте. Однако в некоторых случаях, для некоторых шхерных, пассажирских, научно-исследовательских, промышленных, парусных спортивных судов, нельзя разработать проект без использования постоянного балласта. Попутно отметить, что корабли старого парусного флота всегда признавали твердый балласт. Чалман рекомендует, чтобы масса этого балласта равнялась массе артиллерийского вооружения корабля [92].

При переоборудовании судов, когда их назначение, а следовательно, и распределение нагрузки изменяются и перемещается ее ЦТ, применение постоянного балласта является закономерным.

Иногда прием постоянного балласта требуется для исправления ошибок проектирования. Естественно, этот случай считается крайне нежелательным.

Как правило, во всех упомянутых случаях принимается твердый балласт массой $P_{\text{обт}}$.

Бывают случаи, когда один и тот же корпус должен эксплуатироваться при двух разных осадках и соответственно иным распределении груза. Например, классические лесовозы, перевозящие часть леса на открытой палубе, в обратном рейсе используются как универсальные сухогрузные суда. В первом случае судно сидит по лесную марку, во втором — по более низко расположенную марку, общую для грузных судов типа В (см. ниже — гл. 9). К тому же половина ЦТ во высоте в обоих случаях разное. Если мы создадим судно с достаточной устойчивостью при плавании с генеральным грузом, то при плавании с грузом леса осойчивость его может оказаться недостаточной. Поэтому рациональным решением вопроса является включение в полное водоизмещение судна, сделанного по лесную марку, вспомогательного (при плавании с палубным лесом) жидкого балласта массой $P_{\text{обж}}$.

2.9. Раздел нагрузки «Запас водоизмещения и осойчивости»

Нагрузка масс переменных и/или разделов определяет водоизмещение порожнего судна $D_{\text{пор}}$. Значение $D_{\text{пор}}$ зависит от нагрузки определения масс этих разделов. В свою очередь от $D_{\text{пор}}$, а следовательно, от масс образующих его разделов зависит полное водоизмещение D .

Правильное определение водоизмещения судна имеет исключительное значение, так как по нему производится расчеты и графические разработки, позволяющие выполнять комплект рабочих чертежей. Если из-за неточностей расчета водоизмещение окажется заниженным, то в процессе изготовления рабочих чертежей и постройки судна массы по отдельным разделам нагрузки, а следова-

тельно, и водоизмещение увеличатся по сравнению с первоначальными и создастся перегрузка. В результате этого прежде всего может возрасти осадка судна. Поскольку для транспортных судов с грузом предельная осадка строго регламентирована Правилами о грузовой марке, то перегрузка по разделам порожнего судна приведет к увеличению его грузоподъемности, которая фиксируется в договорных документах, а следовательно, к нарушению обязательности нормальности.

Уменьшение надводного борта, связанное с увеличением осадки для судна без обязательной грузовой марки, вызывает ухудшение их мореходных качеств.

Чаще всего перегруженными оказываются транзитные высоко расположенные части судна, где размещается радиотехническое и электротехническое оборудование. Кроме того, в верхних частях судна находятся помещения экипажа и навигационные помещения, вызывающие особый интерес у представителей заказчика, требования которых могут привести к увеличению масс в соответствующих разделах нагрузки. В результате повышается ЦТ судна, т. е. ухудшается осойчивость. Это может привести к необходимости приема твердого балласта, т. е. к некоторой дополнительной потере грузоподъемности или вообще к уменьшению коэффициента использования водоизмещения.

Чтобы гарантировать выполнение спецификационных данных судна, в его нагрузку входят раздел «Запас водоизмещения», величину которого обуславливают:

принятые измерения и модуль пересчета, данные по поставкам механизмов, устройств, вооружения и т. д. (чем больше процент содержания элементов лозинки, тем больше шансов создать перегрузку за счет контрактных поставок и тем больше должен быть запас водоизмещения);

качество проверки масс в организации, разрабатывающей проект и рабочие чертежи судна (борьба за экономию масс может привести к спорам с заказчиком, требования которого, связанные с нагрузкой, должны рассматриваться особенно внимательно);

весовой контроль* на верфи — строители судна недопустимо на судно заделывают с пересосом (к сожалению, иногда на это не обращается должного внимания).

В то же время излишний запас водоизмещения, принятый в проекте, может привести к увеличению размеров судна.

Поскольку запас водоизмещения принимается для компенсации перегрузки судна, возникающей вследствие пересоса конструкций, создаваемых верфью и полученных ею по контрактным поставкам, его часто выражают в функции водоизмещения порожнего судна $D_{\text{пор}}$ или стандартного водоизмещения $D_{\text{ст}}$.

В случае отсутствия близкого прототипа, с которого может пересчитываться нагрузка, на начальной стадии проектирования

* Перед установкой на судно конструкций, механизмов, комплектующих изделий должны взвешиваться для определения их массы.

следует принимать запас водозмещения, равный от 5 до 4% $D_{\text{всп}}$ или $D_{\text{ст}}$. При этом верхний предел относится к малым судам $D_{\text{всп}} \leq 1000$ т, а нижний — к судам $D_{\text{всп}} > 1000$ т. При близком протоптане эти значения снижают на 1–2%. При переходе от эскизного проекта к техническому запас водозмещения дополнительно снижают на 1%. Запас водозмещения, принятый в техническом проекте, должен быть сохранен при разработке рабочих чертежей.

Так как на начальной стадии проектирования в первую очередь определяется полное водозмещение судна, то запас водозмещения удобнее подсчитывать по формуле

$$P_{12} - P_{2, \text{в}} = P_{2, \text{в}} D = P_{12} D = P_{2, \text{в}} D_{\text{всп}},$$

в результате

$$P_{12} - P_{2, \text{в}} = P_{2, \text{в}} D_{\text{всп}} (D_{\text{всп}}/D) = (1 - \eta_{\text{всп}}) P_{2, \text{в}} D_{\text{всп}} \quad (2.45)$$

Для судов с малыми значениями $\eta_{\text{всп}}$ (пассажирские, рефрижераторные и т. д.) можно принимать $P_{12} = 1-1,5\%$ D или $P_{12} = 2-2,5\%$ D соответственно при наличии и отсутствии близкого протоптана. Для танкеров $P_{12} = 1-1,5\%$ D при отсутствии близкого протоптана и $P_{12} = 0,5-1\%$ D при его наличии.

В результате в начальных стадиях проектирования: при близком протоптане коэффициент $P_{12} = 0,015 \pm 0,005$; при отсутствии близкого протоптана $P_{12} = 0,025 \pm 0,010$.

Значение P_{12} повышается при увеличении коэффициента использования водозмещения. Для судов с очень малым $\eta_{\text{всп}}$ можно рекомендовать в начале проекта указанной величины вследствие того, что отношение водозмещения порожнего судна к полному водозмещению у них больше, чем у судов с большим $\eta_{\text{всп}}$. Вопрос об использовании запаса водозмещения должен решаться главным конструктором.

Обычно одновременно с вопросом определения запаса водозмещения возникает и вопрос о запасе остойчивости (собственно начальной остойчивости), который обеспечивается повышением расчетного положения ЦТ судна или уменьшением расчетной начальной метацентрической высоты.

В случае отсутствия близкого протоптана при определении главных размеров судна на начальной стадии проектирования запас остойчивости (расчетное уменьшение метацентрической высоты) при водозмещении порожнего судна рекомендуется принимать равным 15–20 см (20 см — для судов $D_{\text{всп}} \leq 1000$ т, 15 см — для судов $D_{\text{всп}} > 1000$ т). Наличие близкого протоптана позволяет снизить этот запас на 5 см. При переходе от эскизного проекта к техническому указанные значения уменьшаются на 2 см. Запас остойчивости технического проекта должен быть сохранен и в периоды разработки рабочих чертежей и постройки судна.

Запас остойчивости может оказаться нулевым даже при отсутствии перегрузки, так как уменьшение остойчивости всегда вызывается перераспределением масс по высоте судна. Исторические

примеры такого перераспределения, угрожающего остойчивости, известны. Один из них — уменьшение массы конструкций донного дна в связи с переходом от клепки к сварке с одновременным увеличением массы конструкций верхней палубы.

Обычная причина уменьшения остойчивости — перегрузка в высоко расположенных частях судна. Поэтому ЦТ запаса водозмещения должен быть расположен достаточно высоко, например на уровне верхней (открытой) палубы или даже несколько выше ее при наличии различных надстроек и рубок.

Чтобы иметь запас начальной остойчивости, выраженный в виде добавки к возмущению ЦТ над основной линией (ОЛ), и вы-

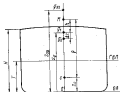


Рис. 2.2. Схема определения положения ЦТ запаса водозмещения от высоты судна.

соту ЦТ запаса водозмещения, можно написать уравнение моментов водозмещения (с включением в него запаса водозмещения) и запаса водозмещения относительно основной линии (рис. 2.2):

$$D z_2 = (D - P_{2, \text{в}}) (z_2 - \Delta z) + P_{2, \text{в}} z_{2, \text{в}} \quad (2.46)$$

где D — расчетное водозмещение (полное, порожнего судна или стандартное); $P_{2, \text{в}}$ — расчетный запас водозмещения; z_2 — возмущение ЦТ судна над ОЛ при расчетном водозмещении (с учетом запаса остойчивости); Δz — запас остойчивости; $z_{2, \text{в}}$ — возмещение ЦТ запаса водозмещения над ОЛ.

Преобразовав формулу (2.46), можно получить

$$\Delta z = \frac{P_{2, \text{в}}}{D - P_{2, \text{в}}} (z_{2, \text{в}} - z_2) \quad (2.47)$$

Выражая величины высот ЦТ над ОЛ через полную высоту борта судна: $z_2 = k_2 H$; $z_{2, \text{в}} = k_{2, \text{в}} H$, а $P_{2, \text{в}} D$ — через измеритель $P_{2, \text{в}}$ находим

$$\Delta z = \frac{P_{2, \text{в}}}{1 - P_{2, \text{в}}} (k_{2, \text{в}} - k_2) H \approx P_{2, \text{в}} (k_{2, \text{в}} - k_2) H. \quad (2.48)$$

Выражение (2.48) дает возможность определить запас остойчивости, соответствующий величине и положению запаса водозмещения.

Если выбрать значение коэффициента k_2 в промжулке 0,6—0,8 (практические пределы его колебаний), а ЦТ запаса водовозмещения принять на уровне верхней палубы, то при изменении $\rho_{\text{в}}$ от 0,01 до 0,06 запас остойчивости будет колебаться от 0,002Н до 0,02Н, т. е. при $H = 5$ м будет $\Delta z = 1 \text{—} 10$ см, а при $H = 10$ м $\Delta z = 2 \text{—} 20$ см.

Таким образом, при небольшом запасе водовозмещения, ЦТ которого размещен на верхней палубе, запас остойчивости может оказаться слишком малым. В этом случае приходится задаваться запасом остойчивости Δz и назначить ЦТ запаса водовозмещения по параболу

$$k_2 = k_2 + \frac{\Delta z}{\rho_{\text{в}} \cdot H} \quad (2.49)$$

2.10. Раздел «Экипаж, провизия, вода, расходные материалы, расходные жидкие среды»

Раздел «Экипаж, провизия, вода, расходные материалы, расходные жидкие среды» (14) нагрузки включает массу экипажа с его багажом, массу необходимых для экипажа провизии, питьевой и мыльной воды, а также различных расходных материалов, потребных при эксплуатации судна. Основную часть нагрузки составляет масса экипажа с потребной ему провизией и водой. В экипаж промысловых судов включаются шлюперовал, т. е. рабочие плавучих рыбоуловов.

Для современных грузовых судов можно оценивать нагрузку этого раздела великом по формулам

$$P_{14} = P_{14} = \rho_{14} D \quad (2.50)$$

или

$$P_{14} = P_{14} = \rho_{14} D^{2,3} \quad (2.51)$$

В рассматриваемом разделе для судов с многочисленным экипажем часто выделяют массу экипажа с его багажом, провизией и водой. В то время как для грузовых судов (сухогрузные суда, танкеры) численность экипажа колеблется от 20 до 40 человек, на промысловых судах (рыбоуловы) она значительно больше, а на боевых кораблях она достигает 5000 чел. (см. аннотации в справочнике Двена). В этих случаях надо подсчитывать массу экипажа с его провизией, багажом, питьевой и мыльной водой отдельно.

Эта масса определяется автономностью судна t_A в сутках. Средняя масса человека с его багажом может быть оценена в 130 кг. Питьевой и мыльной воды на человека в день нужно около 100 л; провизии — около 3 кг.

Таким образом, для грузового судна при автономности $t_A = 10$ сут и экипаже 30 чел. команда с багажом, водой и провизией будет иметь массу около 35 т, а на траулере-рыбоулове при автономности $t_A = 30$ сут и экипаже 100 чел. эти же группы масс до-

стигнут величины свыше 300 т. На больших военных кораблях соответствующие массы будут еще больше.

Отсюда очевидно необходимость применения опрениелей для поддержания запаса воды. Они применяются даже на танкерах, где команда немногочисленна. В. М. Венклер считает, что одна треть запаса питьевой и мыльной воды на танкере должна обеспечиваться опрениителями [33].

В случае выделения и прямого расчета массы экипажа с багажом, провизией и водой по общей массе раздела 14 можно остальную часть раздела рассчитывать по формулам (2.50) и (2.51), назначив соответствующие коэффициенты.

2.11. Раздел нагрузки «Груз перевозимый»

Раздел нагрузки «Груз перевозимый» (15) является основным для транспортных судов. Величину $P_{15} = P_{15}$ этого раздела называют грузоподъемностью, а иногда частой грузоподъемностью, считая ее важной характеристикой транспортного, особенно грузового, судна.

Относительная величина полной массы раздела 15 — коэффициент использования подвешивания η , по частой грузоподъемности — часто фигурирует при рассмотрении проектов как основная характеристика транспортных, особенно грузовых судов.

Следует иметь в виду, что в раздел нагрузки 15 включают массу пассажиров с багажом, а также воды и провизии для них (подгруппа 1502).

Вместе с разделами 14 «Экипаж и т. д.», 16 «Запасы топлива, масла, воды», 17 «Переменные жидкие грузы» он образует действо судна DW (см. выше — гл. 1).

При эксплуатации судна возникают случаи, когда отсутствуют части действия, особенно по разделу 15, приходится для сохранения их мореходности компенсировать введенные грузы по разделу 18 «Жидкий балласт».

В зависимости от дальности плавания t при неизменном полном подвешивании и неизменном действии может колебаться грузоподъемность, которая с увеличением t приближается к DW .

Как уже указывалось в 2.8, для некоторых судов могут назначаться две грузоподъемности P , даже при одном и том же запасе топлива P_1 .

2.12. Разделы нагрузки «Переменные жидкие грузы», «Жидкий балласт», «Грузы, снабжение, запасы дополнительные»

Номенклатура масс, входящих в раздел 17 «Переменные жидкие грузы», довольно ограничена. Это — вода в шестернях усложненных качки, в дюралевых фокшлюзах и сбора загрязненных вод, планетальных бассейнах.

О жидком балласте (раздел нагрузки 18 «Жидкий балласт»), размещаемый в условиях аккумуляции судна, например при снятии с судна других перевозимых грузов, будет говориться ниже — в гл. 5.

Раздел 19 «Грузы, снабжение, запасы дополнительных» имеет значение для тех судов, которые не подпадают под правила о грузовой марке, т. е. для которых их осадка и надводный борт не нормируются.

Жидкий балласт, включаемый в нагрузку (в состав перевозимых грузов), принимается на судно с целью поддержания при эксплуатации необходимой остойчивости, обеспечения нужной осадки (характеризуемой осадкой и дифференном судна), предотвращения крена при аварии.

Жидким балластом иногда заполняют топливные отсеки, размещенные между бортами и продольными переборками судна, после нарастающего вытекания в них топлива. Это предотвращает сильный крен после затопления отсеков одного борта при аварии. Например, на лайнере «Андреа Дориа», где такое замещение водой было предусмотрено, бортовые отсеки при столкновении со шведским лайнером «Стокгольм» 25 июля 1956 г. оказались пустыми, отчет «Андреа Дориа» перевернулся [39]. Заполнение водой бортовых топливных отсеков (в частности, на линкорах) привело к тому, что в процессе эксплуатации водозамещение таких кораблей почти не применялось [21].

На ряде грузовых судов, совершающих обратный рейс без груза, приходится принимать значительное количество балласта, чтобы обеспечить погружение носа (борьба со сменетгом) и винта (борьба за его КПД, борьба с набрашкой).

2.13. Раздел нагрузки «Запасы топлива, масла и воды»

Раздел «Запасы топлива, масла и воды» (16) часто называют просто «Топливо», так как последнее составляет основную его часть.

Полная нагрузка по разделу 16

$$P_{16} = P_{\tau} + P_{\text{тн}} + P_{\text{м}} \quad \text{или} \quad P_{16} = P_{\text{тн}} + P_{\text{тм}} + P_{\text{тл}} \quad (2.52)$$

где $P_{\tau} = P_{\text{тн}} -$ масса топлива для ЭУ и топлива для судовых нужд; $P_{\text{тн}} = P_{\text{тн}} -$ масса смазочного масла; $P_{\text{тл}} = P_{\text{тл}} -$ масса питьевой воды.

В отдельных случаях может оказаться необходимым учесть количество топлива, расходуемого для подогрева перевозимого груза (например, сырой нефти, парафинистого мазута и других вязких грузов).

При переходе от ранних стадий проектирования к последующим расчет нагрузки по разделу 16 производится с возрастанием подробностью. Если на начальной стадии проектирования основной расчет всей нагрузки, в том числе нагрузки по разделу «Топливо»,

выполняется проектировщиками-кораблестроителями, то в дальнейшем в расчете должны участвовать и специалисты по ЭУ и судовым системам (отоплению и др.). Следует отметить, что и на начальной стадии проектирования прикладываемые при определении нагрузки величины должны быть согласованы с указанными выше специалистами. Для членов формулы (2.52) характерны следующие соотношения:

Тип главного двигателя ЭУ	$P_{\text{тн}}/P_{\text{т}}$	$P_{\text{тл}}/P_{\text{т}}$
Паровая турбина	0,005—0,010	0,005—0,200
Газовая »	0,005—0,010	—
Дизель	0,010—0,200	—

На отношение $P_{\text{тл}}/P_{\text{т}}$ значительно влияет заданная производительность испарительной установки, которая в свою очередь оказывает влияние на общий расход топлива и массу ЭУ.

Для современных сравнительно крупных турбоколов значение $P_{\text{тл}}/P_{\text{т}}$ близко к нижнему пределу. Например, в работе [48] приводятся для сухогрузного судна типа «Ленинский комсомолец» $P_{\text{тл}}/P_{\text{т}} = 0,06$; для танкера типа «Эрага» $P_{\text{тл}}/P_{\text{т}} = 0,06$.

Таким образом, можно принять

$$P_{16} = k_0 P_{\tau} \quad (2.53)$$

где коэффициент

$$k_0 = \frac{P_{\text{тн}} + P_{\text{тм}} + P_{\text{тл}}}{P_{\tau}} = 1,09 \pm 0,03.$$

Для уточнения k_0 можно обращаться к прототипам. При определенном типе установки выбор k_0 не представит затруднений.

Не следует, конечно, забывать о частных случаях, например о необходимости обеспечить топливом специальные обогретьельные системы, о чем говорилось выше (подогрев перевозимой нефти), или механизмы насоса на плавучих мастерских и нефтезаводах.

В данном случае масса топлива, подобно массе оборудования пела, может быть рассчитана прямо по заданной в зависимости от количества и мощности устанавливаемых механизмов. При определении водозамещения его рассматривают как *маленькую массу*.

Устанавливая связь между элементами задания и величинной P_{16} , имеем

$$P_{16} = k_0 k_1 P_0 N \quad (2.54)$$

где k_0 — коэффициент морского запаса, учитывающий возрастание расхода топлива с увеличением продолжительности рейса из-за штормовой погоды, обростания корпуса, встречных течений, а на начальных стадиях проектирования — расход топлива некоторыми механизмами на стоянке судна; i — ходовое время; ρ_0 — удельный расход топлива; $1/\text{kBт} \cdot \text{ч}$; N — мощность механизмов, kBт .

Подставляя выражение (2.54) в выражение (2.53), получаем

$$P_{16} = P_{\tau} = k_0 k_1 \rho_0 N \quad (2.55)$$

Учитывая, что ходовое время $t = r/v$, где r — дальность плавания или radius действия; v — скорость (тактико-технические или технико-экономические элементы) и $N = (D^{\alpha} v^{\beta})/C$, получаем

$$P_{\text{пл}} = P_1 = k_1 k_2 v r^{\alpha} \frac{D^{\alpha} v^{\beta-1}}{C} \quad (2.56)$$

Из формулы (2.56) следует, что требуемый запас топлива увеличивается прямо пропорционально дальности плавания r и удельному расходу топлива p_1 ; отстает от роста водоизмещения ($\alpha < 1$) и роста мощности, поскольку мощность пропорциональна v^{β} . В результате можно сделать вывод о необходимости уменьшения удельного расхода топлива p_1 , а также о преимуществе судов большого водоизмещения, у которых основная часть весаита используется под полезный груз.

В настоящее время определен нижний предел p_1 для ЭУ транспортных судов.

Установки	p_1 , кг/кВт·ч
паротурбинные	0,13—0,17
дизельные	0,11—0,14
газотурбинные	0,12—0,17

В перспективе можно ожидать снижения p_1 для газотурбинных установок до 0,11 кг/кВт·ч.

В атомных установках масса топлива неограничена, и практически следует учитывать только те слагаемые P_1 , которые относятся к топливу вспомогательных двигателей, питательной воде (или другой среде) для реакторов P_{14} и связанным материалам P_{15} .

Формула (2.56) позволяет рассмотреть вопрос об изменении дальности плавания при различных скоростях судна и неизменном запасе топлива и водоизмещении.

Относительно выделенной к полной скорости, будем иметь

$$P_4 = P_{11} k_1 k_2 v r^{\alpha} \frac{D^{\alpha} v^{\beta-1}}{C} = k_1 k_2 v r^{\alpha} \tau_1 \frac{D^{\alpha} v^{\beta-1}}{C_1}$$

Примем $k_1 = k_2$; $k_3 = k_{11}$; $D = D_1$, тогда имеем

$$p_1 r \frac{v^{\beta-1}}{C} = p_{11} \tau_1 \frac{v_1^{\beta-1}}{C_1} \quad \text{и} \quad \frac{r_1}{r} = \frac{p_1}{p_{11}} \left(\frac{v}{v_1} \right)^{\beta-1} \frac{C_1}{C}$$

Так как $(\beta-1) > 1$, снижение скорости значительно повышает дальность плавания при неизменном p_1 и C .

Если для расчета мощности применить формулу адмиралтейского коэффициента (2.39), то получим

$$\frac{r_1}{r} = \frac{p_1}{p_{11}} \left(\frac{v}{v_1} \right)^{\beta} \frac{C_1}{C}$$

Считая условно, что и p_1/p_{11} мало отличается от единицы, получим при постоянной скорости, что r_1 по отношению к r увеличивается в 4 раза.

При изменении p_1 следует внести некоторую поправку в результаты: для дизелей p_1 несколько уменьшается при увеличении скорости, а атом может возрасти значительно (в пределах 25%), что создает выигранный в дальности выигрыш при увеличении скорости.

УРАВНЕНИЕ НАГРУЗИК В ФУНКЦИИ ВОДОИЗМЕЩЕНИЯ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДОИЗМЕЩЕНИЯ

3.1. Постановка задачи

Как указано в гл. 2, по формуле (2.2) водоизмещение или масса плавающего тела D равна массе вытесненной им воды $\rho_0 V$. Водоизмещение D представляет собой сумму масс конструкции, механизмов, оборудования, перевозимого груза, топлива и т. п., составляющих нагрузку судна, т. е.

$$D = \sum_{i=1}^{i=n} P_i \quad (3.1)$$

Номера разделов i по действующему стандарту нагрузки здесь даны в предположении вычисления полного водоизмещения и грузов дополнительных (водоизмещения наибольшего).

В соответствии с необходимостью могут быть определены подобным образом и другие виды водоизмещения, например, обычно определяемое для гражданских судов полное водоизмещение:

$$D = \sum_{i=0}^{i=10} P_i \quad (3.2)$$

Выражения (3.1) и (3.2) называют уравнениями нагрузки (иногда также уравнениями масс).

Одна часть масс, входящих в формулы (3.1) и (3.2), может быть выражена в функции водоизмещения $P(D)$, другая часть — $P_{\text{пл}}$ задается и признается независимой от D . Поэтому можно записать

$$D = P(D) + P_{\text{пл}} \quad (3.3)$$

В самом общем случае можно считать, что все массы, входящие в формулу (3.3), зависят от D , будучи функциями разных степеней D , в том числе нулевой степени.

Решение уравнения (3.3) даст искомое водоизмещение, соответствующее заданным независимым массам $P_{\text{пл}}$, а также параметрам, входящим в функцию $P(D)$, в частности скорости, дальности плавания, размерностям масс и т. д. Массы $P(D)$ могут быть вычислены для любого заданного D , но искомое водоизмещение будет соответствовать только одному уравнению (3.3).

Графическое решение этого уравнения показано на рис. 3.1. В точке пересечения кривой масс $P(D) + P_{\text{пл}}$ и прямой плав-

чести $D = D$ находится решение уравнения (3.3), т. е. $D_{\text{взм}}$. В этой точке удовлетворяется и закон Архимеда, так как объемное водоземещение V , определяемое размерами и коэффициентом обая полноты судна, будет соответствовать его нагрузке, т. е. водоземещению D . Как видно из рис. 3.1, уравнение имеет единственный корень. Если бы функция $P(D)$ в дальнейшем стала расти, имея производную $P'(D) > 1$, то возможно появление второго корня D . Однако достаточно найти первый корень, т. е. минимальное водоземещение. Заметим, что для судов на подводных крыльях из-за резкого увеличения массы крыльцевого устройства с ростом D функция $P(D)$ может иметь именно такой вид [36].



Рис. 3.1. Графическое решение уравнения нагрузки [в форме (3.3)].

Вместо уравнения (3.3) до введения системы СИ составлялось уравнение весов, в котором рассматривалось равенство водоземещения сумме масс разделов нагрузки $D' = \Sigma P'$. Величина D' измерялась в тоннах силы и численно равнялась D в тоннах (мегаграммах) массы.

Если бы мы попытались сейчас решить это уравнение весов, то пришлось бы определять водоземещение в килограммах: $1 \text{ кН} = 10^3 \text{ Н}$ или мегаграммах $1 \text{ МН} = 10^6 \text{ Н}$. Первым из этих единиц были для судостроения, вторая — слишком велика. Поэтому судостроители перешли от весов к массам, единицы измерения которых позволяют получать величины водоземещения. Так, в удобных и применяемых значениях, судно имеет водоземещение 10 000 т, или 10 000 Мг.

Уравнение (3.3) можно преобразовать:

$$D - P(D) - P_{\text{взм}} = 0. \quad (3.4)$$

В этом случае оно имеет другое графическое решение, которое будет давать на оси абсцисс при пересечении с осью $D - P(D) - P_{\text{взм}}$, т. е. при обращении $D - P(D) - P_{\text{взм}}$ в нуль (рис. 3.2).

3.2. Составление и решение уравнения нагрузки

Когда по уравнению нагрузки определяется полное водоземещение судна, выражение (3.3) приобретает вид

$$D = P(D) + P_{\text{взм}} - \rho_{\text{в}} D^{\alpha_1} + \rho_{\text{в}} D^{\alpha_2} + \dots + \rho_{\text{в}} \frac{D^{\alpha_n} \rho^n}{c} + \dots + \dots + \rho_{\text{в}} D + \rho_{\text{в}} k_1 k_2 \frac{D^{\alpha_n} \rho^n}{c} r + P_{\text{взм}} + \dots \quad (3.5)$$

Вопрос о том, какие принять измерители ($\rho_{\text{в}1}, \rho_{\text{в}2}, \dots$ и т. д.) и показатели степени при D , является весьма важным. В гл. 2 указывалось, что для α_{11}, α_{12} могут применяться значения $1/2$ и 1; для $n = 1/2$ и $1/3$; для $\alpha = 2,5; 3,0; 3,25$ и т. д. Для судов одинаковых типов и скоростных групп показатели степени в уравнении (3.5) принимаются одинаковыми (хотя они могут изменяться в ходе технического прогресса).

Измерители связаны с назначением судна, его архитектурно-конструктивным типом и материалом конструкций, массы которых учитываются в рассматриваемом разделе. Они изменятся при изменении степени, в которую возводится D в выражении для массы по разделу. Наиболее распространенный вид функции $P(D)$ следующий:

$$P(D) = (\rho_{\text{в}1} + \rho_{\text{в}2} + \rho_{\text{в}3} + \dots + \rho_{\text{в}n} + \dots) D + \frac{\rho_{\text{в}}^2 + \rho_{\text{в}} k_1 k_2 \rho^n}{c} D^2, \quad (3.6)$$

а также

$$P(D) = (\rho_{\text{в}1} + \rho_{\text{в}2}) D + (\rho_{\text{в}3} + \rho_{\text{в}4} + \dots) D^2 + \frac{\rho_{\text{в}}^2 + \rho_{\text{в}} k_1 k_2 \rho^n}{c} D^2. \quad (3.7)$$

В ряде случаев разделы нагрузки, имеющие малые массы, объединяются, например, $P_{\text{в}1}, P_{\text{в}2}$ и $P_{\text{в}3}$ могут быть объединены.

В общем виде выражения (3.6) и (3.7) могут быть записаны так:

$$P(D) = AD + ED^2; \quad (3.8)$$

$$P(D) = AD + ED^2 + KD^2. \quad (3.9)$$

Уравнения нагрузки, соответствующие выражениям (3.8) и (3.9), будут иметь вид

$$D = AD + ED^2 + P_{\text{взм}}; \quad (3.10)$$

$$D = AD + ED^2 + KD^2 + P_{\text{взм}}. \quad (3.11)$$

При подстановке $x = D^{1/2}$ уравнение (3.10) приводится к кубическому и решается аналитически.

В ряде случаев при введении в формулу (3.5) зависимостей, более точно отражающих изменение массы по разделу при изменении D , уравнение нагрузки приобретает вид, не допускающий точного аналитического решения. Такой вид уравнения (3.11).

Подобные уравнения чаще всего решают графически (см. рис. 3.1 и 3.2), а иногда путем последовательных приближений.

Обычно для транспортных и других гражданских судов по уравнению нагрузки определяют D , отнесенное к осадке по грузовой марке (полное водоизмещение).

Так как некоторые суда универсального назначения, например лесовозы, перевозят также генеральные грузы, имеют две грузовые марки, соответствующие двум осадкам, приходится решать уравнение нагрузки и определить водоизмещение, размеры и коэффициенты формы для одного варианта с последующим расчетом водоизмещения для другого варианта.

Для кораблей скорость на испытаниях, как это уже было указано выше, должна соответствовать нормальному водоизмещению [9]. Для таких судов уравнение нагрузки приобретает вид

$$D_{\text{испр}} = \rho_0 D_{\text{испр}} + \rho_0 \Delta D_{\text{испр}} + \dots + P_m + \frac{P_r}{2} + P_n + P_{\text{отс}}$$

где

$$P_m = \rho_m N = \rho_m \frac{D_{\text{испр}}^m}{C};$$

$$P_r = \rho_r k_r k_m \frac{D_{\text{испр}}^m \sigma_{\text{ис}}^2}{C} r.$$

Показатели степени m и n берутся из статистического анализа по однопонным кораблям, близким по скорости к проектируемому. При их отсутствии ограничиваются определенными коэффициентами C , значения m и n , например, по формуле адмиралтейских коэффициентов или формуле В. В. Давыдова.

В приведенном уравнении для оценки P_r используют обычно экономическую скорость, а для P_m — скорость на испытаниях. Таким образом, одним из конкретных видов уравнения будет

$$D_{\text{испр}} = (\rho_0 + \rho_0 \Delta) D_{\text{испр}} + (\rho_2 + \rho_3 + \dots) D_{\text{испр}}^2 + P_m + P_{r/2} + P_n + P_{\text{отс}} + \rho_n \frac{D_{\text{испр}}^n \sigma_{\text{ис}}^2}{C_{\text{исп}}} + \rho_r k_r k_m \frac{D_{\text{испр}}^m \sigma_{\text{ис}}^2}{C_{\text{исп}}} r. \quad (3.13)$$

Поскольку требуются также данные по $D_{\text{полн}}$ или $D_{\text{ст}}$, то после получения $D_{\text{испр}}$ из формулы (3.13) их можно определить так: $D_{\text{полн}} = D_{\text{испр}} + P_r/2$; $D_{\text{ст}} = D_{\text{испр}} - P_r/2$.

3.3. Некоторые формы уравнения нагрузки.

Уравнение коэффициента использования водоизмещения.

Составление предварительной таблицы нагрузок проектируемого судна

При проектировании буксиров и толкачей обычно задается их мощность N . В результате масса $P_m = \rho_m N$ переходит из $P(D)$ в P_m . Часто известна скорость задается число t часов работы

энергетической установки и $P_r = \rho_r k_r k_m N t$. Уравнение в этом случае может быть приведено к линейному:

$$D = (\rho_{01} + \rho_{02} + \dots + \rho_{11} + \dots) D + (\rho_m + \rho_r k_r k_m t) N.$$

Отсюда

$$D = \frac{\rho_m + \rho_r k_r k_m t}{1 - \rho_{01} - \rho_{02} - \rho_{03} - \dots} N. \quad (3.14)$$

Таким образом, здесь водоизмещение буксира оказывается пропорциональным мощности его энергетической установки.

Так как для буксиров различных назначений — морских, речных, портовых — характерны весьма разные размеры и нагрузки и ходовое время t , то коэффициент пропорциональности между N и D в уравнении (3.14) изменится очень сильно: приблизительно от 0,12 (у портовых) до 0,48 (у морских).

Характер задания на проектирование грузовых судов позволяет составить для них уравнение нагрузки и в особой форме. Часто в техническом задании указывается не грузоподъемность судна, а его дедвейт. В этом случае уравнение нагрузки может быть записано так:

$$D = (\rho_{01} + \rho_{02} + \rho_{03} + \rho_{04} + \rho_{05} + \rho_{06} + \rho_{07} + \rho_{08} + \rho_{09} + \rho_{10} + \rho_{11}) D + P_m + DIF. \quad (3.15)$$

Если разделить все члены уравнения на D , то получим

$$1 = \rho_{01} + \rho_{02} + \rho_{03} + \rho_{04} + \rho_{05} + \rho_{06} + \rho_{07} + \rho_{08} + \rho_{09} + \rho_{10} + \rho_{11} + P_m/D + DIF.$$

отсюда

$$\rho_{\text{отс}} = 1 - \rho_{01} - \rho_{02} - \rho_{03} - \rho_{04} - \rho_{05} - \rho_{06} - \rho_{07} - \rho_{08} - \rho_{09} - \rho_{10} - \rho_{11} - P_m/D. \quad (3.16)$$

Из выражения (3.16), которое называется уравнением коэффициента использования водоизмещения по дедвейту, видно влияние всех размерностей нагрузки, а также относительной массы механизма на $\rho_{\text{отс}}$. Если коэффициент $\rho_{\text{отс}}$ принимается без анализа влияния изменения ряда размерностей и мощности механизма по $\rho_{\text{отс}}$, то это может привести к ошибкам при определении водоизмещения.

Следует отметить, что учет связи размеров нагрузки как прямо пропорциональных D снижает точность (3.15) и (3.16).

В тех случаях, когда задано скорость, а не мощность, но могут быть использованы только определенные механизмы, водоизмещение может быть найдено следующим образом.

Уравнение (3.10) или (3.11) решают любым способом. По полученному водоизмещению определяют мощность механизма. Затем подбирают двигатель, мощность которого близка к полученной. Зная мощность и марку этого двигателя, по данным поставщика можно установить его массу — величину P_m , а также P_r , что по-

зависит перенести из $P(D)$ в $P_{\text{вн}}$ два члена уравнения: $P_{\text{вн}}$ и $P_1 = -r_1 A_1 \delta N (\delta^2 \delta)$. После этого решается уравнение нагрузки по второму приближению. При этом можно, например, принять

$$P(D) = (p_{\text{вн}} + p_{\text{вн}})D + (p_{\text{вн}} + p_{\text{вн}} + \dots)D^2; \quad (3.17)$$

$$P_{\text{вн}} = P_{\text{вн}} + P_{\text{вн}} + P_{\text{вн}}$$

Получив значения водоизмещения из уравнения во втором приближении, можно составить таблицу нагрузки проектируемого судна по тем основным разделам, которые учитывались при составлении этого уравнения. В таблицу полезно ввести данные (по судам того же назначения, и в первую очередь по судку-прототипу), которые послужили основанием для определения большинства изобретательских масс и других параметров проектируемого судна. В нее должны быть также введены относительные массы по разделам.

Составление такой таблицы дает возможность: проверить правильность решения уравнения нагрузки; сравнить нагрузку проекта с нагрузкой других судов того же назначения. Отклонения в значениях масс по разделам, особенно относительные (в процентах от D), должны быть объяснены с точки зрения требований задания и т.д.;

получить исходные материалы для определения капитальных вложений на постройку судна и для ряда планово-экономических расчетов.

3.4. Влияние изменения параметров и независимых масс на нагрузку. Дифференциальная форма уравнения нагрузки в функции водоизмещения. Коэффициент Нормана

Если будут внесены изменения в слагаемые функции $P(D)$ и в независимые массы $P_{\text{вн}}$, входящие в уравнение нагрузки, то вид соответствующих им кривых также изменится (рис. 3.3). Точка пересечения кривой $\Sigma P_2 = P_2(D) + P_{\text{вн}2}$ с прямой $D = D$ займет положение A_1 , отличающееся от точки пересечения A_0 кривой $\Sigma P_1 = P_1(D) + P_{\text{вн}1}$ с той же прямой (индекс «0» соответствует первоначальным значениям), $D = D$.

Приращение водоизмещения

$$\Delta D = \overline{A_0 E} = \overline{A_1 E}$$

170

$$\overline{A_0 E} = \overline{E_0 F} + \overline{A_0 F}$$

Приращение суммарной массы в точке A_0

$$\overline{A_0 F} = P_1(D_0) - P_1(D_0) + P_{\text{вн}1} - P_{\text{вн}2} = \Delta P(D_0) + \Delta P_{\text{вн}}$$

Заменив кривую $\Sigma P_1 = P_1(D) + P_{\text{вн}1}$ касательной к ней в точке F и считая приближенно, что точка A_1 получается при пе-

ресечении этой касательной с прямой $D = D$, запишем

$$\frac{\overline{A_0 F}}{\overline{F_0 G}} = \frac{\Delta P_1(D)}{\Delta D} \approx \frac{dP_1(D)}{dD}$$

откуда

$$\overline{A_0 E} = \frac{dP_1(D)}{dD} \cdot \overline{F_0 G} = \frac{dP_1(D)}{dD} \Delta D$$

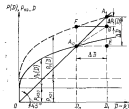


Рис. 3.3. Изменение водоизмещения проектируемого судна при изменении параметров и независимых масс в форме (3.3).

и

$$\overline{A_1 E} = \overline{A_0 E} = \Delta D = \overline{A_0 F} + \overline{A_1 E} = \Delta P(D_0) + \Delta P_{\text{вн}} + \frac{dP_1(D)}{dD} \Delta D. \quad (3.18)$$

Таким образом, приращение водоизмещения судна, у которого изменены и другие параметры элементов по сравнению с аналогичными элементами судна-прототипа, не исчерпывается двумя первыми членами в (3.18). Появление третьего члена обусловлено увеличением новой функции $P_1(D)$ при переходе от точки F к точке A_1 , следовательно, и водоизмещения судна для достижения равновесия между ним и силой поддержания $D = p_0 V$.

Из выражения (3.18) можно получить

$$\Delta D - \frac{dP_1(D)}{dD} \Delta D = \Delta P(D_0) + \Delta P_{\text{вн}}$$

и

$$\Delta D = \frac{\Delta P(D_0) + \Delta P_{\text{вн}}}{1 - \frac{dP_1(D)}{dD}}. \quad (3.19)$$

$$\eta_n = \frac{1}{1 - \frac{dP_1(D)}{dD}} \quad (3.20)$$

можно записать

$$\Delta D = \eta_n [\Delta P(D_0) + \Delta P_{0n}] \quad (3.21)$$

Формула (3.21), которую можно назвать дифференциальной формой уравнения нагрузки, определяет закон увеличения водоизмещения при малых приращениях параметров (измерителей масс и тактико-технических или технико-экономических элементов). На

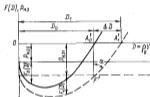


Рис. 3.4. Изменение водоизмещения проектируемого судна при изменении параметров и связанных масс (в форме (3.4)).

существование такого закона впервые указал Жак-Огюстен Норман. Формула, описывающая этот закон, была уточнена В. С. Дорожним и И. В. Виноградовым.

Коэффициент η_n называется коэффициентом изменения (вариации) водоизмещения или коэффициентом Нормана.

Формула (3.21) достаточно точна только при ограниченных изменениях нагрузки, так как при ее выводе участок кривой $P_1(D)$ был заменен касательной к этой кривой в точке F (рис. 3.3).

Из формулы (3.21) следует, что

$$\eta_n = \frac{\Delta D}{\Delta P(D_0) + \Delta P_{0n}} \quad (3.22)$$

т. е. коэффициент Нормана есть отношение приращения водоизмещения к приращению нагрузки (при неизменном водоизмещении) в результате изменения параметра (измерителей и тактико-технических или технико-экономических элементов) и независимых масс.

Этот коэффициент геометрически выражается тангенсом угла FA_0G . Из рис. 3.3 видно, что $\angle FA_0G > 45^\circ$, а $\lg FAG_0 > 1$. Чем круче поднимается кривая $P_1(D) + P_{0n}$, учитывая новую параметра, тем больше $\lg FAG_0$.

Если мы обратимся к уравнению в форме (3.4) (см. рис. 3.4), то получим те же результаты.

Пределы применения формулы (3.21) не исследовались в достаточной мере. Практически в случае приращения масс до 20 % D_0 можно ожидать достаточно точных результатов, получаемых по формуле (3.21).

3.5. Вычисление приращения масс при изменении параметров

Для возможности вычисления приращения водоизмещения ΔD по формуле (3.21) необходимо найти как η_n , так и приращение $\Delta P(D_0)$ масс от изменения параметров в предположении неизменности водоизмещения.

Приращение независимых масс вычисляется весьма просто: $\Delta P_{0n} = P_{0n} - P_{0n0}$. Приращения масс, зависящих от D и ряда параметров, могут быть найдены двумя способами.

В первом способе, заключающемся в вычислении конечных разностей, нагрузка по корпусу при изменении $\rho_n = \rho_{n1}$ меняется так: $\Delta P_{s1} = \Delta P_n = P_{s1} - P_{s0} = (\rho_{s1} - \rho_{s0}) D_0^3$.

нагрузка по разделам «Устройства судовой» и «Системы»: $\Delta P_{s2} = \Delta P_y = P_{s2} - P_{s0} = (\rho_{s2} - \rho_{s0}) D_0^3$; $\Delta P_{s3} = \Delta P_c = -(\rho_{c1} - \rho_{c0}) D_n$ или $\Delta P_{s2} = \Delta P_y = (\rho_{s1} - \rho_{s0}) D_0^3$; $\Delta P_{s3} = -\Delta P_c = (\rho_{c1} - \rho_{c0}) D_0^3$, нагрузка по ΔV

$$\begin{aligned} \Delta P_{s4} &= \Delta P_n - \rho_{n0} \frac{D_0^3 \eta^2}{C_1} - \rho_{n0} \frac{D_0^3 \eta^2}{C_2} = \\ &= \left(\rho_{n1} \frac{\eta^2}{C_1} - \rho_{n0} \frac{\eta^2}{C_2} \right) D_0^3. \end{aligned}$$

нагрузка по валу

$$\Delta P_{s5} = \Delta P_T = \left(\rho_{T1} k_{Tn} \frac{\eta^2}{C_1} - \rho_{T0} k_{Tn} \frac{\eta^2}{C_2} \right) D_0^3.$$

По другим разделам приращения определяются аналогично. В результате

$$\Delta P(D_0) = \Delta P_{s1} + \Delta P_{s2} + \dots + \Delta P_{s5} + \dots \quad (3.23)$$

Приращение запаса водоизмещения может быть вычислено по формуле $\Delta P_{11} = \Delta P_{s,2} = (\rho_{s,2} - \rho_{s,0}) D_0^3$.

В том случае, когда в качестве прототипа используется спроектированное судно, у которого нет запаса водоизмещения (он исполь-

лоши), приращение запаса водонизмещения $\Delta P_{11} = \Delta P_{\lambda, \lambda} = -\rho_{\lambda, \lambda} D_{\lambda} = P_{\lambda, \lambda}$.

Особого внимания заслуживает возможность учета данным способом значительных изменений конструкции и материала корпуса.

Если, например, необходимо заменить материал корпуса, то можно по известным размерам и другим характеристикам прототипа произвести набор корпуса из другого материала, считая водонизмещение постоянным. Тогда соответствующий член выражения (3.23) будет $\Delta P_{\lambda, \lambda} = \Delta P_{\lambda} = P_{\lambda, \lambda} - P_{\lambda, \lambda}$, где $P_{\lambda, \lambda}$ и $P_{\lambda, \lambda}$ — масса корпуса из нового и старого материалов.

Таким же образом можно учитывать изменение материала и конструкции и по другим разделам, пересчитывая нагрузку и полетая водонизмещение судна неизменным, а затем используя формулу (3.23).

Во втором способе пересчета нагрузки при изменении параметров вычисляются приближенно, по формулам дифференцирования.

Для раздела «Корпус»

$$\Delta P_{\text{кп}} = \Delta P_{\text{к}} \approx \frac{\partial P_{\text{к}}}{\partial \rho_{\text{к}}} d\rho_{\text{к}} - d\rho_{\text{к}} D_{\text{к}}$$

Аналогично получается приращение

$$\Delta P_{\text{св}} = \Delta P_{\text{с}} \approx d\rho_{\text{с}} \cdot D_{\text{с}} \text{ и т. д.}$$

или

$$\Delta P_{\text{св}} = \Delta P_{\text{с}} \approx \frac{\partial P_{\text{с}}}{\partial \rho_{\text{с}}} d\rho_{\text{с}} - d\rho_{\text{с}} \cdot D_{\text{с}}^{\text{св}} \text{ и т. д.}$$

и другие, в частности, $\Delta P_{11} = \Delta P_{\lambda, \lambda} \approx d\rho_{\lambda, \lambda} D_{\lambda}$.

Формула для приращения масс механизмов, соответствующая выражению (3.23), имеет вид

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{м}} = \Delta P_{\text{м}} &\approx \frac{\partial P_{\text{м}}}{\partial \rho_{\text{м}}} d\rho_{\text{м}} + \frac{\partial P_{\text{м}}}{\partial v} dv + \frac{\partial P_{\text{м}}}{\partial C} dC = \\ &= \frac{D_{\text{м}}^{\text{м}}}{C_{\text{м}}} d\rho_{\text{м}} + m_{\text{м}} \frac{D_{\text{м}}^{\text{м}} v^{\alpha-1}}{C_{\text{м}}} dv - \rho_{\text{м}} \frac{D_{\text{м}}^{\text{м}} v^{\alpha}}{C_{\text{м}}} dC \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{м}} = \Delta P_{\text{м}} &\approx \rho_{\text{м}} \frac{D_{\text{м}}^{\text{м}} v^{\alpha}}{C_{\text{м}}} \left(\frac{d\rho_{\text{м}}}{\rho_{\text{м}}} + \alpha \frac{dv}{v} - \frac{dC}{C} \right) = \\ &= P_{\text{м}} \left(\frac{d\rho_{\text{м}}}{\rho_{\text{м}}} + \alpha \frac{dv}{v} - \frac{dC}{C} \right). \end{aligned} \quad (3.24)$$

Формула для массы топлива $P_{\text{т}}$ записывается после аналогичных преобразований так:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{т}} = \Delta P_{\text{т}} &\approx P_{\text{т}} \left[\frac{d\rho_{\text{т}}}{\rho_{\text{т}}} + \frac{d\lambda_{\text{т}}}{\lambda_{\text{т}}} + \frac{d\lambda_{\text{т}}}{\lambda_{\text{т}}} + \right. \\ &\left. + (\alpha-1) \frac{dv}{v} + \frac{d\rho}{\rho} - \frac{dC}{C} \right]. \end{aligned} \quad (3.25)$$

Все перечисленные формулы дают возможность анализировать влияние параметров на рост разделов нагрузки. Напомню, что необходимо обращать внимание на то, чтобы связь зависимости, используемые при расчете коэффциента нагрузки, соответствовали действительному изменению такой характеристики судна, как мощность [36].

Если следовать формуле адмиралтейских коэффциентов, то величина λ в выражениях (3.24) и (3.25) будет равна 3, по Давиду — 3,25, а по формуле (2.37) — 2,5.

3.6. Вычисление коэффциента Нормана

Для получения коэффциента Нормана требуется найти производную функции $P_{\text{н}}(D)$ по водонизмещению. Значение этой производной подставляем при $D = D_{\text{н}}$.

Функция $P_{\text{н}}(D)$, в которой изменены параметры:

$$\begin{aligned} P_{\text{н}}(D) = P_{\text{н1}} - P_{\text{н2}} - P_{\text{н3}} + P_{\text{н4}} + \dots + P_{\text{нn}} + \dots + \\ + P_{\text{нm}} + \dots \end{aligned} \quad (3.26)$$

а ее производная по D

$$\frac{dP_{\text{н}}(D)}{dD} = \frac{dP_{\text{н1}}}{dD} + \frac{dP_{\text{н2}}}{dD} + \frac{dP_{\text{н3}}}{dD} + \dots \quad (3.27)$$

Выражая массы, входящие в формулу (3.26), как функции D и известных параметров, получим

$$\begin{aligned} \frac{dP_{\text{н}}(D)}{dD} = P_{\text{н1}} + P_{\text{н2}} + P_{\text{н3}} + \dots + P_{\text{нn}} + mP_{\text{нm}} \frac{D^{m-1} v^{\alpha}}{C_{\text{н}}} + \\ + mP_{\text{н1}} k_{\text{н1}} k_{\text{н1}} \frac{D^{m-1} v^{\alpha}}{C_{\text{н}}} \rho \end{aligned} \quad (3.28)$$

или, например,

$$\begin{aligned} \frac{dP_{\text{н}}(D)}{dD} = \frac{P_{\text{н1}}}{D} + \frac{2}{3} \frac{P_{\text{н2}}}{D} + \frac{2}{3} \frac{P_{\text{н3}}}{D} + \dots \\ \dots + \frac{P_{\text{нn}}}{D} + m \left(\frac{P_{\text{нm}}}{D} + \frac{P_{\text{н1}}}{D} \right). \end{aligned}$$

При $D = D_0$

$$\frac{dP_1(D_0)}{dD} = \frac{P_{01}}{D_0} + \frac{2}{3} \frac{P_{21}}{D_0} + \frac{2}{3} \frac{P_{11}}{D_0} + \dots \\ \dots + \frac{P_{2n,1}}{D_0} + m \left(\frac{P_{0n}}{D_0} + \frac{P_{1n}}{D_0} \right) \quad (3.29)$$

В том случае, когда массу раздела можно считать пропорциональной $D^{3/2}$, следует применить именно эту зависимость.

Следует обратить внимание на то, что все массы, зависящие от D , являются таковыми функцией измененных параметров, поэтому отношения их к D_0 в общем случае не равны аналогичным отношениям для судна-прототипа. Отношение P_{11}/D_0 и другие характеризуют нагрузку измененного прототипа, для которого сила поддержания не равно его нагрузке.

Чтобы использовать данные по нагрузке судна-прототипа, нужно учесть, что $P_{00} = P_{00}D$; $P_{01} = P_{01}D$, следовательно, при измененном водоизмещении $P_{01} = (P_{01}/P_{00}) P_{00}$.

Таким же образом можно получить

$$P_{0n} = \frac{P_{0n} C_0}{P_{00} C_1} P_{00} \\ P_{21} = \frac{P_{21} k_1 k_2 k_3 k_4^{-1} C_0}{P_{20} k_1 k_2 k_3 k_4^{-1} C_1} P_{20}$$

Отсюда выражение для η_b будет иметь вид

$$\eta_b = \frac{1}{1 - \frac{dP_1(D_0)}{dD}}$$

$$1 - \left[\frac{P_{01}}{P_{00}} \frac{P_{00}}{D_0} + \frac{2}{3} \frac{P_{21}}{P_{20}} \frac{P_{20}}{D_0} + \dots + \frac{P_{2n,1}}{P_{2n,0}} \frac{P_{2n,0}}{D_0} + \right. \\ \left. + m \frac{P_{0n} C_0}{P_{00} C_1} \frac{P_{00}}{D_0} + m \frac{P_{1n} k_1 k_2 k_3 k_4^{-1} C_0}{P_{1n} k_1 k_2 k_3 k_4^{-1} C_1} \frac{P_{1n}}{D_0} \right] \quad (3.30)$$

Когда изменение $P(D) + P_{0n}$ происходит только за счет изменения P_{0n} , т. е. $\Delta P(D) = 0$, а $\Delta P_{0n} \neq 0$, формула (3.30) упрощается:

$$\eta_b = \frac{1}{1 - \frac{dP_0(D_0)}{dD}} \quad (3.31)$$

т.е.

$$\frac{dP_0(D_0)}{dD} = \frac{P_{00}}{D_0} + \frac{P_{1,0n}}{D_0} + \\ + \frac{2}{3} \left(\frac{P_{20}}{D_0} + \frac{P_{30}}{D_0} + \dots \right) + m \frac{P_{0n} + P_{1n}}{D_0} \quad (3.32)$$

По этим формулам η_b может быть вычислен, например, при изменении грузоподъемности P_0 для гражданских судов или вооружения P_{0n} и боезапаса P_{1n} для военных кораблей.

Всегда часто формулу (3.31) применяют даже при $\Delta P(D) \neq 0$ (при таком условии ее вывел и сам Норман). Тогда несколько снижается точность результата, но одновременно упрощаются вычисления и, кроме того, появляется возможность пользоваться одним постоянным η_b для нескольких вариантов изменения параметров и независимых масс без учета особенностей этого изменения.

Формула (3.31) позволяет оценить порядок величин η_b , следовательно, порядок изменения водоизмещения ΔD при вариации параметров и независимых масс.

Особенно велик η_b у судов с малыми независимыми массами; в этом случае растет $P(D)$ и $dP(D)/dD$, а с ним и знаменатель выражений (3.30) и (3.31).

Так, при суммарной величине первых членов выражения (3.30), равной 0,20, относительной массе механизмов $P_{00}/D_0 = 0,20$ и толщине $P_{20}/D_0 = 0,10$ получаем (при $m = 2/3$) $\eta_b = 3,33$. Такой коэффициент типичен для быстроходных судов. При относительных массах, характерных для танкеров, где первые члены выражения (3.32) составляют в сумме около 0,20, $P_{00}/D_0 \approx 0,02$, а $P_{20}/D_0 \approx 0,10$ $\eta_b = 1,30$.

Таким образом, для быстроходного судна увеличение грузоподъемности судна на 100 т даст приращение в 333 т, для танкера — около 130 т.

Из зависимости (3.30), а также из приведенных примеров следует, что уменьшение относительных масс — важный фактор при проектировании: чем ниже эти массы, тем легче увеличивать грузоподъемность грузовых судов и вооружение кораблей.

Формула (3.30) более точная, чем выражение (3.31), потому она позволяет конкретно оценить влияние приращений измерителей масс на ΔD .

К сказанному следует добавить, что приращение функции, $\Delta P(D)$ в значительной мере определяется тем, как меняются измерители масс, зависящих от D , коэффициент C и показатель степени при v . Желательно, чтобы измерители нагрузки уменьшались так же, как и показатели степени при v , а коэффициент C увеличивался (за счет удлинения обводов, например, при использовании бульбового носа).

**ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ГЛАВНЫХ РАЗМЕРЕНИЙ СУДА.
УРАВНЕНИЕ НАГРУЗКИ В ФУНКЦИИ
ГЛАВНЫХ РАЗМЕРЕНИЙ
И КОЭФФИЦИЕНТА ОБЩЕЙ ПОЛНОТЫ**

**4.1. Пути определения главных размерений
и коэффициента общей полноты судна
при известном водоизмещении**

В предыдущей главе были указаны пути определения водоизмещения судна по уравнению нагрузки в алгебраической форме или по дифференциальному способу, безруководящему из использования коэффициента Норриша. При достаточно малых данных, заданных в уравнение нагрузки, правильно установленной функциональной связи между массами по разделам нагрузки и водоизмещением, при обоснованном назначении параметров членов, входящих в уравнение, и запаса водоизмещения можно считать, что в процессе дальнейшего проектирования водоизмещение сохранится, если будут соблюдаться основные тактико-технические или технико-экономические требования и заданные независимые массы. Полученное водоизмещение, а также разбивка соответствующей нагрузки могут служить базой для целого ряда расчетов, устанавливающих экономические характеристики и связанные с кливированием и организацией постройки проектируемого судна.

Следующий шаг после определения водоизмещения судна — это выбор основных характеристик его размеров (главных размерений L , B , T , H) и его формы (коэффициента общей полноты δ). Эти величины часто называют главными элементами судна.

Примененное выше выражение закона Архимеда (2.2), являющееся одновременно уравнением плавучести, дает основания для определения главных размерений судна*. Если считать D , δ и η заданными, то в уравнении (2.2) будет четыре неизвестных: δ , L , B , T . Тогда

$$D = \rho_0 \delta M B T \quad \text{или} \quad V = \delta M B T.$$

В качестве L ниже, как правило, будет использоваться длина $L_{\text{вдв}}$ по так называемой конструктивной ВЛ (КВЛ), совпадающей с ГВЛ гражданских судов и соответствующей нормальному

* Высота борта H , определяется также и главными размерениями, и (2.2) не входит. Об определении H — см. с. 5.

3.7. Связь между коэффициентами η_0 и η_1

Коэффициенты η_0 и η_1 являются, в известной степени, характеристиками нагрузки.

По (3.3) для прототипа $D_0 = P(D_0) + P_{\text{мг}}$.

Для грузовой судна независимые массы будут представлены одной грузоподъемностью $P_0 = P_{\text{мг}} = \eta_0 D_0$ и $D_0 = P(D_0) + \eta_1 D_0$. Отсюда

$$\eta_0 = 1 - \frac{P(D_0)}{D_0}. \quad (3.33)$$

Преобразовывая выражение (3.32), получаем

$$\frac{dP_0(D_0)}{dD_0} = \frac{P_{\text{мг}} + P_{\text{мг, мс}}}{D_0} + \frac{P_{\text{гн}} + P_{\text{гн, мс}} + \dots}{D_0} + \frac{P_{\text{мг}} + P_{\text{мг, мс}}}{D_0} - \frac{1}{3} \frac{P_{\text{гн}} + P_{\text{гн, мс}} + \dots}{D_0} - (1-m) \frac{P_{\text{мг}} + P_{\text{гн}}}{D_0}. \quad (3.34)$$

или

$$\frac{dP_0(D_0)}{dD_0} = \frac{D_0 - P_0}{D_0} - \frac{1}{3} \frac{P_{\text{гн}} + P_{\text{гн, мс}} + \dots}{D_0} - (1-m) \frac{P_{\text{мг}} + P_{\text{гн}}}{D_0}. \quad (3.35)$$

Принимая по адмиралтейской формуле $m = 2/3$, получаем

$$\begin{aligned} \frac{dP_0(D_0)}{dD_0} &= 1 - \eta_0 - \frac{1}{3} \left(\frac{D_0 - P_{\text{мг}} - P_{\text{мг, мс}} - P_0}{D_0} \right) - \\ &= \frac{2}{3} - \frac{2}{3} \eta_0 + \frac{1}{3} \frac{P_{\text{мг}} + P_{\text{мг, мс}}}{D_0} \end{aligned}$$

и по (3.34)

$$\eta_0 = \frac{1}{1 - \frac{2}{3} + \frac{2}{3} \eta_0 - \frac{P_{\text{мг}} + P_{\text{мг, мс}}}{D_0}} \quad (3.36)$$

и, наконец,

$$\eta_0 = \frac{3}{2\eta_0 + 1 - \frac{P_{\text{мг}} + P_{\text{мг, мс}}}{D_0}} \quad (3.37)$$

В (3.36) отчетливо видна роль η_0 при определении η_0 . Точность этой формулы одинакова с точностью формул (3.31) и (3.32).

Если сделать предположение о прямой пропорциональности всех разделов нагрузки величине D_0 , то получим из (3.33) и (3.34)

$$\eta_0 = 1/\eta_1. \quad (3.37)$$

Эта простая зависимость будет давать несколько преувеличенное значение η_0 при том же значении η_1 .

Для судов с большим η_1 точность последней формулы почти равна точности формул (3.31) и (3.32). При малых величинах η_1 , например для быстроходных судов, величина η_0 при расчете по (3.36) может оказаться завышенной примерно на 30 % [9].

водоизмещению кораблей. Для гражданских судов часто применяется длина между перпендикулярами L_{pp} . Иногда используют и другие виды длины. Каждый раз эти случаи будут ниже оговариваться особо. Важно при совместном рассмотрении двух судов сравнивать одноименные ВЛ.

Ширина B измеряется в наиболее широкой части КВЛ.

Существует ряд соображений, в соответствии с которыми возможность произвольности изменения каждой из этих величин ограничивается. Так, величина δ связана с ходкостью судна и со стоимостью его постройки, длина судна L помимо этого, еще и с комфортом для пассажиров, и с удобством размещения оборудования, оборудования (на промысловых судах) и пр., ширина судна B — с остойчивостью и плавностью бортовой качки. Осадка T также зависит от этих условий. Все три главных размера могут оказаться ограниченными навигационными условиями, а также условиями, которые ставит завод-изготовитель: акваторией порта, длиной причальной линии, глубиной каналов, шириной и глубиной шлюзов, размерами стеллажей для дока и т. д.

Все сказанное накладывает дополнительные связи на сомножители уравнения плавучести, которое должно решаться совместно с другими уравнениями. Часть из них содержит одно неизвестное. В значительном числе случаев L может быть выражена как функция заданной скорости и водоизмещения: $L = f(v, V)$.

Эта функция преобразовывается обычно к виду

$$L = \frac{L}{\sqrt[3]{V}} = f(v), \quad (4.1)$$

где L — относительная длина судна, для нахождения которой существует ряд формул (см. 9.9 и рис. 9.7).

Коэффициент общей плавности обычно задается как функция относительной скорости — числа Фруда, т. е. функция заданной скорости и принятой длины L (см. гл. 9 и рис. 9.10):

$$\delta = f(Fr) = f\left(\frac{v}{\sqrt{gL}}\right).$$

Ширина судна B и его осадка T связаны с начальной остойчивостью: отношение $B/T = \delta_T$ является функцией начальной относительной метацентрической высоты и некоторых других характеристик судна (см. гл. 7).

Наиболее точным способом определения b_T для многих групп судов определенного назначения является составление и решение уравнения остойчивости (см. гл. 7). В ряде случаев величину b_T берут из данных по судам, о которых известно, что их остойчивость обеспечена и они близки к проектируемому по вертикальному распределению нагрузке. Для судов смешанного плавания и крупнотоннажных танкеров ограничение осадки приводит к особенно большим значениям b_T . Запасная обеспеченность остойчивости делает возможным применение в этом случае уравнения остойчивости, по которому определяется нижний предел b_T .

В некоторых случаях вместо $L = L\sqrt[3]{V}$ используется величина $l_B = L/B$, связанная с l и одновременно с $b_T = B/T$:

$$l = \frac{L}{\sqrt[3]{V}} = \frac{L}{\sqrt[3]{\Delta \rho_0 g T}} = \frac{1}{\sqrt[3]{\Delta \rho_0}} \sqrt{\frac{L^2}{g T}} = \frac{(L/B)^{2/3} (B/T)^{1/3}}{\sqrt[3]{\Delta \rho_0}} = \frac{\delta_T^{1/3} b_T^{1/3}}{\sqrt[3]{\Delta \rho_0}}. \quad (4.2)$$

В свою очередь,

$$l_B = \delta^{1/3} \delta_T^{2/3} \delta_T^{-1/3}. \quad (4.3)$$

Величина l_B , одновременно связанная через l и δ с ходкостью, а через b_T с остойчивостью, является менее четкой характеристикой ходовых качеств, чем l , непосредственная связь которого с ходкостью установлена рядом исследований (см. гл. 9).

Сказанное позволяет составить систему уравнений для определения δ и L , B , T . Она имеет вид

$$D = k_p \Delta L B T, \quad l = \frac{L}{\sqrt[3]{V}} = f(v); \quad \delta = f\left(\frac{v}{\sqrt{gL}}\right).$$

Ее решают в таком порядке:

- 1) определяют $l = f(v)$ по заданной скорости v (см. гл. 9) и затем $L = l^3 \sqrt[3]{D/\Delta \rho_0}$;
- 2) по скорости v и длине L вычисляют число Фруда $Fr = v/\sqrt{gL}$ и затем δ (см. гл. 9);
- 3) из уравнения остойчивости по принятой относительной метацентрической высоте $\bar{h} = h/B$ принимают $b_T = B/T$ (см. гл. 7). В случае недостатка данных для составления уравнения остойчивости $b_T = B/T$ принимается по пропорции.

В результате получаются два уравнения:

$$B T = \frac{D}{k_p \Delta} \quad \text{и} \quad \frac{B}{T} = \delta_T.$$

Совместное решение этих уравнений дает

$$B = \sqrt{\frac{D \delta_T}{k_p \Delta}}; \quad T = \frac{B}{\delta_T}.$$

Иногда решают другую систему, в которой вместо l используют $l_B = L/B$. Отсюда

$$D = k_p \Delta \frac{L^3}{\delta_T^3} \quad \text{и} \quad L = \sqrt[3]{\frac{D \delta_T^3}{k_p \Delta}}; \quad B = \frac{L}{l_B}; \quad T = \frac{B}{\delta_T}.$$

В некоторых случаях можно назначить l , l_0 , b_T и b непосредственно по статистическим данным. Такой подход допустим, если необходимо получить грубо приближенные значения B и T .

Выше приводилась формула для относительной длины судна $I = L_0^2/V$. Аналогичные формулы могут быть получены для относительной ширины

$$b = \frac{B}{\sqrt{V}} = \sqrt{\frac{b_T}{\Delta H_0}} \quad (4.4)$$

и для относительной осадки

$$t = \frac{T}{\sqrt{V}} = \frac{1}{\sqrt{\Delta H_0 t_0^2}} \quad (4.5)$$

Эти зависимости иногда применяют в расчетах, связанных с определением B и T , так как для судов определенного назначения b и t колеблются обычно в сравнительно узких пределах. Однако применять формулы (4.4) и (4.5) следует с осторожностью, так как зависимость их от требований и характеристик свойств судна в отличие от l четко не установлена.

4.2. Уравнение нагрузки в функции главных размерений судна и коэффициента общей полноты. Его составление и решение

В гл. 3 рассматривался способ решения уравнения нагрузки, когда единственной осевой характеристикой размеров судна являлось его водоизмещение. Возможна и другая постановка задачи, при которой составляется уравнение нагрузки в функциях главных размерений и коэффициента общей полноты δ . В этом случае оно содержит несколько неизвестных, что позволяет более точно учитывать разную нагрузку. В частности, может быть найдено более точное значение мощности, чем получаемое по формуле адмиралтейских коэффициентов (2.36) или близким к ней формул (2.37), (2.38).

В общем случае уравнение нагрузки в функции главных размерений и δ записывается так:

$$k_p \Delta LBT - P(\delta, L, B, T, H, v, r, C, \dots) - P_{st} = 0, \quad (4.6)$$

где $k_p \Delta LBT = D$; $P(\delta, L, B, T, \dots)$ — сумма масс, являющаяся функцией многих параметров, в том числе и измерителей; P_{st} — сумма заданных (независимых) масс.

Ряд графиков и таблиц позволяет определить мощность механизма для любой практически интересной комбинации главных размерений и δ . В связи с этим имеет смысл разбить $P(\delta, L, B, T, H, v, r, C, \dots)$ на два члена: $F(\delta, L, B, T, \dots)$, объединяющий все массы, не связанные функционально с мощностью механизма,

и $P(N)$ — массы ЭВ и топлива. Тогда

$$P(N) = P_{st} + P_r - p_{st}N + k_1 k_2 p_r N \frac{r}{v} = \left(P_{st} + k_1 k_2 p_r \frac{r}{v} \right) N. \quad (4.7)$$

При плавании с пониженной экономической скоростью (для увеличения r)

$$P(N) = \left(P_{st} + k_1 k_2 p_r \frac{r_{em}}{v_{em}} \right) N_{em}.$$

Величину $F(\delta, L, B, T)$ можно записать по-разному на основании многочисленных зависимостей, приведенных в гл. 2. В качестве примера покажем путь составления и решения уравнения нагрузки для гражданских судов, когда масса корпуса и ряда других разделов определяется в функции от LBH :

$$F(\delta, L, B, T) = P_{st} + P_{01} + \dots + P_{1n} + \dots = \\ = q_{01}LBH + (q_{02} + q_{03} + \dots)(LBH)^{0.2} + p_{11}\delta LBT + \dots$$

Небольшая по величине нагрузка по разделу «Вооружение» может быть причислена к независимым массам, основную часть которых составит грузоподъемность. Уравнение (4.6) в этом случае примет вид

$$k_p \Delta LBT - q_{01}LBH - (q_{02} + q_{03} + \dots)(LBH)^{0.2} - p_{11}\delta LBT - \\ - \left(P_{st} + k_1 k_2 p_r \frac{r}{v} \right) N - P_{st} = 0. \quad (4.8)$$

Принимая по заданной скорости v относительную длину $l = \frac{L}{l_0}$, в соответствии с указанным в гл. 9 выражением D через L и принятое t :

$$D = k_p \Delta LBT = p_2 (L/l_0)^3. \quad (4.9)$$

Кубический модуль LBT может быть записан как

$$LBT = \frac{k_p \Delta LBT}{k_p \delta} \frac{H}{T} = \frac{D}{k_p \delta} \frac{H}{T} = \frac{1}{\delta^3} \left(\frac{l}{l_0} \right)^3 h_T. \quad (4.10)$$

Следует учесть, что величина $h_T = HT$ является характеристикой вместимости судна и может быть задана (см. гл. 5).

Учитывая (4.9) и (4.10), преобразуем (4.8) и получим

$$\left[p_2 (1 - p_{11}) - q_{01} \frac{h_T}{\delta^3} \right] \left(\frac{l}{l_0} \right)^3 - \\ - \left[(q_{02} + q_{03} + \dots) \left(\frac{h_T}{\delta^3} \right)^{0.2} \right] \left(\frac{l}{l_0} \right)^3 = \\ = \left(P_{st} + k_1 k_2 p_r \frac{r}{v} \right) N - P_{st} = 0. \quad (4.11)$$

Это уравнение может быть решено графически или путем подстановок. Для этой цели следует вычислить ряд значений его левой части при последовательно изменяющихся значениях L . Порядок вычислений будет следующим.

По заданию на проектирование принимаются P_{00} , r , v , а по данным прототипа (в случае необходимости с поправкой) — значениями $\delta_2 = \delta/T$ и $\delta_T = \delta/L$, характеризующие начальную остойчивость и вместимость. По прототипу (или по статистическим данным), а также по характеристикам предлагаемого ЗУ устанавливаются прочие параметры, входящие в (4.11). Назначают величину L . По заданной скорости (гл. 9) принимают l . Определяют число Фруда $Fr = v\sqrt{gl}$ и по нему — δ (гл. 9). По графикам Тейлора (или графикам Эбра и т. д.) находят мощность N . Величина L , обращающая левую часть уравнения (4.11) в нуль, является искомой.

Если выразить массу корпуса через зависимость, приведенные в гл. 2, то можно получить выражение (4.6), решение которого позволяет точнее учесть влияние на D главных размерений и δ . При принятии $l = f(\delta, \delta_T, \delta = f(\delta, L)$, δ_T можно получить B и T в функции L .

Из зависимости (4.3) следует

$$B = \frac{L}{f_2} \left(\frac{\delta_T}{\delta} \right)^{1/2}; \quad T = \frac{\delta}{\delta_T} = \frac{L}{f_2} \cdot \frac{1}{(\delta \delta_T)^{1/2}}$$

Уравнения, о которых мы сейчас говорили, интересны тем, что позволяют получить ряд решений при изменении параметров судна. Решение таких уравнений облегчается при использовании ЭВМ.

4.3. Дифференциальная форма уравнения масс, выраженных в функции главных размерений и коэффициента общей полноты

Дифференцирование уравнения масс, выраженных в функции δ , L , B , T , позволяет проанализировать влияние изменения этих величин на водоизмещение и нагрузку судна, а также влияние изменения параметров и независимых масс, с одной стороны, и δ , L , B , T — с другой. Такая форма уравнения нагрузки получила большее распространение, чем алгебраическая форма. Изменение водоизмещения D , а следовательно, и V может происходить в результате изменения извертельной нагрузки, тактико-технических или технико-экономических элементов судна (σ , σ_1), а также величин δ , L , B , T . Нагрузка может выражаться в функции δ , L , B , T и H , а те D или V . Таким образом (см. рис. 3.3),

$$\Delta D = \Delta P(D_0) + \Delta P_{00} + \Delta P_1(D_0), \quad (4.12)$$

где $\Delta P(D_0) = P(\delta_2, L_0, B_0, T_0, H_0, v_0, r_0, \rho_0, \dots) - P(\delta_0, L_0, B_0, T_0, H_0, v_0, r_0, \rho_0, \dots)$ — приращение нагрузки прототипа в результате изменения параметров и H до величин, принятых в проекте, при постоянных δ , L , B , T (индекс 0 относится к про-

тотипу, а индекс «0» — к проекту); $\Delta P_{00} = P_{00} - P_{00,0}$ — приращение независимых масс прототипа до величин аналогичных масс проекта; $\Delta P_1(D_0) = P(\delta_1, L_1, B_1, T_1, H_1, v_1, r_1, \rho_1, \dots) - P(\delta_0, L_0, B_0, T_0, H_0, v_0, r_0, \rho_0, \dots)$ — приращение нагрузки проекта, обусловленное изменением δ , L , B , T при переходе от точки A_0 до новой точки равновесия A_1 (переход совершается при новых величинах параметров).

Как видно из рис. 3.3,

$$\Delta P(D_0) + \Delta P_{00} = \overline{\Delta P}^*$$

Величины ΔD , $\Delta P(D_0)$, $\Delta P_1(D_0)$ можно связать с приращением отдельных главных размерений и параметров, например ΔD с $\Delta \delta$, ΔL , ΔB , ΔT , приняв эти величины настолько малыми, что приращение $\Delta D = \Delta(A\rho_0 \delta L B T)$ может рассматриваться как полный дифференциал:

$$\begin{aligned} \Delta D &\approx dD = \frac{\partial D}{\partial \delta} d\delta + \frac{\partial D}{\partial L} dL + \frac{\partial D}{\partial B} dB + \frac{\partial D}{\partial T} dT = \\ &= \frac{D_0}{\delta} d\delta + \frac{D_0}{L} dL + \frac{D_0}{B} dB + \frac{D_0}{T} dT \approx \\ &\approx \frac{D_0}{\delta} \Delta \delta + \frac{D_0}{L} \Delta L + \frac{D_0}{B} \Delta B + \frac{D_0}{T} \Delta T. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Аналогично

$$\begin{aligned} \Delta P(D_0) &\approx dP(D_0) = \frac{\partial P(D_0)}{\partial \sigma} d\sigma + \frac{\partial P(D_0)}{\partial v} dv + \\ &+ \frac{\partial P(D_0)}{\partial r_1} dr_1 + \dots \approx \frac{\partial P(D_0)}{\partial \sigma} \Delta \sigma + \dots \end{aligned}$$

Наконец,

$$\begin{aligned} \Delta P_1(D_0) &\approx dP_1(D_0) = \frac{\partial P_1(D_0)}{\partial \delta} d\delta + \frac{\partial P_1(D_0)}{\partial L} dL + \frac{\partial P_1(D_0)}{\partial B} dB + \\ &+ \frac{\partial P_1(D_0)}{\partial T} dT \approx \frac{\partial P_1(D_0)}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial P_1(D_0)}{\partial L} \Delta L + \\ &+ \frac{\partial P_1(D_0)}{\partial B} \Delta B + \frac{\partial P_1(D_0)}{\partial T} \Delta T. \end{aligned}$$

Сказанное позволяет записать уравнение (4.12) в виде

$$\begin{aligned} &\left[\frac{D_0}{\delta} - \frac{\partial P_1(D_0)}{\partial \delta} \right] \Delta \delta + \left[\frac{D_0}{L} - \frac{\partial P_1(D_0)}{\partial L} \right] \Delta L + \\ &+ \left[\frac{D_0}{B} - \frac{\partial P_1(D_0)}{\partial B} \right] \Delta B + \left[\frac{D_0}{T} - \frac{\partial P_1(D_0)}{\partial T} \right] \Delta T = \\ &= \frac{\partial P_1(D_0)}{\partial \sigma} \Delta \sigma + \frac{\partial P_1(D_0)}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial P_1(D_0)}{\partial r_1} \Delta r_1 + \dots + \Delta P_{00} \end{aligned} \quad (4.14)$$

Первые уравнение (4.14) в несколько другой форме получил И. Г. Бубнов. Он вычислял члены уравнения, возникающие от изменения параметра, т. е. $\Delta P_1(D_0) = \frac{\partial P_1(D_0)}{\partial \delta} \Delta \delta + \dots$ без подсчета частных производных нагрузки по параметрам, уменьшенных на приращение параметра, а путем вычисления разности между новой и старой нагрузкой по статье (после изменения параметров). Проводя такую операцию, И. Г. Бубнов называл судно-прототип, у которого были изменены параметры, измененным прототипом. Более того, чтобы полная нагрузка измененного прототипа, соответствующая новым параметрам, укладывалась в прежние водоизмещение, Бубнов уменьшал водоизмещение от водоизмещения массы $P_{\text{м}}$ настолько, насколько увеличивалась нагрузка от изменения параметров [31].

Рассматривая выражение (4.14), можно обратить внимание на некоторые его особенности. Левая часть уравнения показывает, что увеличение плавучести с ростом размера судна и коэффициента δ должна преобладать над ростом нагрузки (в величине которой учтено изменение параметров). Правая его часть представляет приращение нагрузки судна при увеличении масс, зависящих от параметров, и механических масс в случае постоянства первоначальных главных размеров L, B, T и коэффициента δ .

При вычислении $\frac{\partial P_1(D_0)}{\partial \delta}$ и других частных производных $P_1(D_0)$ следует, рассматривая $P_1(D_0) = \Sigma P_1(D_0)^*$, брать всю нагрузку, учитывая всевозможные параметры. Если масса корпуса вычисляется с использованием зависимостей, приведенных в табл. 2.3 или табл. 2.4, то, например, производная массы наружной обшивки по длине для однопалубного судна, если коэффициент $\rho_{\text{об}}$ этой массы изменится, будет

$$\frac{\partial P_{\text{об}}(D_0)}{\partial L} = \frac{\partial P_{\text{об}} \cdot 1,11L(1,7H + \delta B) T^{1,5} H^{1,5}}{\partial L} = \\ = \rho_{\text{об}} \cdot 1,11(1,7H + \delta B) T^{1,5} H^{1,5} = \rho_{\text{об}} \frac{P_{\text{об}}}{L} = \frac{\rho_{\text{об}}}{\rho_{\text{м}}} \frac{P_{\text{м}}}{L}.$$

Из сказанного следует, что нагрузка по статье «Наружная обшивка», учитываемая при дифференцировании по L , должна быть изменена в отношении коэффициентов $\rho_{\text{об}}$ и $\rho_{\text{м}}$, т. е. приведена к нагрузке «исправленного» прототипа.

Относительно полной высоты борта H , фигурирующей в выражении для $P_1(D_0)$, могут быть сделаны разные предположения: 1. Высота судна как балка расчет с его длиной, во отношение $L_H = LH$ постоянно; тогда $H = LH_0$.

* Иллюстрация при D означает, что здесь, как и в формулах (4.12) — (4.14), все расчеты, связанные с вычислением значений δ, L, B, T , базируются на исходных значениях этих величин.

2. Значение H растет пропорционально осадке при постоянном $\delta_T = H/T$; $H = \delta_T T$, что гарантирует, в жесткой стени, сохранение относительного запаса плавучести и удельной вместимости.

3. Величина H фигурирует в расчетах как постоянная.

4. Величина H заменяется некоторой величиной H_G в этом случае H изменяется как параметр, и в левой части уравнения появится член $\frac{\partial P_1(D_0)}{\partial H} \Delta H$, где $\Delta H = H_1 - H_0$.

4.4. Вычисление производной массы механизмов и топлива по коэффициенту общей плавучести и главным размерам

Выше отмечалось, что при определении мощности ЭУ по одной из приближенных формул верной значительная погрешность. И. Г. Бубнов очень резко высказывался о приближенных формулах для определения мощности: «... уже сама несогласованность этих формул свидетельствует об их неграмотности» [31, с. 248]. Правда, во времени этого высказывания прошло более половины века и положены в этом отношении несколько изменений. Однако по-прежнему интересным остаются те рекомендации, которые были сделаны И. Г. Бубновым по учету мощности, фигурирующей в нижних членах функции $P_1(D_0)$, при ее дифференцировании по δ, L, B, T . Он рекомендует использовать графики или таблицы серийных испытаний моделей для получения данных об изменении мощности. В соответствии с этой рекомендацией можно предложить такой порядок нахождения требуемых величин:

1. Выбираем график или таблицу сопротивления воды движению судна, наиболее близкого по обводам к проектируемому (график Тейлора, графике 60-й серии и т. д.).

2. При известной мощности механизмов $N_M(v_0)$ судна-прототипа, соответствующей его расчетной скорости v_0 , по графикм определяем сопротивление движению и буксировочную мощность судна с элементами прототипа $N_P(v_0)$. Таким образом, может быть определен условный аэродинамический коэффициент прототипа

$$\eta_0 = \frac{N_M(v_0)}{N_P(v_0)}.$$

3. Для «исправленного прототипа» находим буксировочную мощность при такой расчетной скорости с использованием тех же графиков $N_P(v_0)$.

4. Тем же способом определяем мощность N_P для судна длиной L , увеличенной на 1 м: $N_P(v_0, L+1)$, и уменьшенной на 1 м: $N_P(v_0, L-1)$.

5. Производную мощности по длине судна получаем так:

$$\frac{\partial N_P(v_0)}{\partial L} \approx \frac{\Delta N_P(v_0)}{\Delta L} = \frac{N_P(v_0, L+1) - N_P(v_0, L-1)}{2}.$$

6. Производная мощности по δ , B и T будет

$$\frac{\partial N_s(\nu)}{\partial \delta} \approx \frac{\Delta N_s(\nu)}{\Delta \delta} = \frac{N_s(\nu, \delta + 0.01) - N_s(\nu, \delta - 0.01)}{0.02}$$

$$\frac{\partial N_s(\nu)}{\partial B} \approx \frac{\Delta N_s(\nu)}{\Delta B} = \frac{N_s(\nu, B+1) - N_s(\nu, B-1)}{2}$$

$$\frac{\partial N_s(\nu)}{\partial T} \approx \frac{\Delta N_s(\nu)}{\Delta T} = \frac{N_s(\nu, T+1) - N_s(\nu, T-1)}{2}$$

Надо учесть, что размер шага ΔL , $\Delta \delta$, ΔB , ΔT , по которому брались мощности, может быть изменен в соответствии с условиями задачи. Для небольших судов шаг по ширине ΔB и осадке ΔT может быть smaller, например $\Delta B = 0,2$ м, $\Delta T = 0,2$ м.

7. Принимаем протуберантный коэффициент равным η_p , получаем соответственно мощность ЗУ «эквивалентного» прототипа:

$$N_s(\nu) = \frac{N_s(\nu)}{\eta_p}$$

8. Определим массы элементов и производные их по δ , L , B , T :

$$P_{m1}(D_0) = \rho_{m1} N_s(\nu) = \rho_{m1} \frac{N_s(\nu)}{\eta_p}$$

$$\frac{\partial P_{m1}(D_0)}{\partial \delta} = \frac{\rho_{m1}}{\eta_p} \frac{\partial N_s(\nu)}{\partial \delta}$$

$$\frac{\partial P_{m1}(D_0)}{\partial L} = \frac{\rho_{m1}}{\eta_p} \frac{\partial N_s(\nu)}{\partial L}$$

$$\frac{\partial P_{m1}(D_0)}{\partial B} = \frac{\rho_{m1}}{\eta_p} \frac{\partial N_s(\nu)}{\partial B}$$

$$\frac{\partial P_{m1}(D_0)}{\partial T} = \frac{\rho_{m1}}{\eta_p} \frac{\partial N_s(\nu)}{\partial T}$$

9. Аналогично могут быть получены производные по массе топлива:

$$\frac{\partial P_{m2}(D_0)}{\partial \delta} = k_{m2} k_{11} \rho_{11} \frac{\gamma_1}{\nu_1} \frac{1}{\eta_p} \frac{\partial N_s(\nu)}{\partial \delta} \approx$$

$$\approx k_{m2} k_{11} \rho_{11} \frac{\gamma_1}{\nu_1} \frac{1}{\eta_p} \cdot \frac{N_s(\nu, \delta + \Delta \delta) - N_s(\nu, \delta - \Delta \delta)}{2 \Delta \delta}$$

$$\frac{\partial P_{m2}(D_0)}{\partial L} = k_{m2} k_{11} \rho_{11} \frac{\gamma_1}{\nu_1} \frac{1}{\eta_p} \frac{\partial N_s(\nu)}{\partial L} \approx$$

$$\approx k_{m2} k_{11} \rho_{11} \frac{\gamma_1}{\nu_1} \frac{1}{\eta_p} \cdot \frac{N_s(\nu, L + \Delta L) - N_s(\nu, L - \Delta L)}{2 \Delta L}$$

$$\frac{\partial P_{m2}(D_0)}{\partial B} = k_{m2} k_{11} \rho_{11} \frac{\gamma_1}{\nu_1} \frac{1}{\eta_p} \frac{\partial N_s(\nu)}{\partial B} \approx$$

$$\approx k_{m2} k_{11} \rho_{11} \frac{\gamma_1}{\nu_1} \frac{1}{\eta_p} \cdot \frac{N_s(\nu, B + \Delta B) - N_s(\nu, B - \Delta B)}{2 \Delta B}$$

$$\frac{\partial P_{m2}(D_0)}{\partial T} = k_{m2} k_{11} \rho_{11} \frac{\gamma_1}{\nu_1} \frac{1}{\eta_p} \frac{\partial N_s(\nu)}{\partial T} \approx$$

$$\approx k_{m2} k_{11} \rho_{11} \frac{\gamma_1}{\nu_1} \frac{1}{\eta_p} \cdot \frac{N_s(\nu, T + \Delta T) - N_s(\nu, T - \Delta T)}{2 \Delta T}$$

Следует отметить, что в случае необходимости можно так же определить производные других масс, заданных в табличной или графической форме. Сначала находят приращение соответствующей массы при изменении δ , L , B , T на определенную (малую) величину, а затем производные, например

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta} \approx \frac{P_i(\delta + \Delta \delta) - P_i(\delta - \Delta \delta)}{2 \Delta \delta}$$

4.5. Решение уравнения масс, заданных в функции коэффициента обшивки полноты и главных размерений, в дифференциальной форме

Для составления уравнения (4.14) требуется информация по размерениям (L , B , T , H) и форме (δ) судна-прототипа, по его нагрузке и виду модулей тех масс, которые подлежат дифференцированию.

И. Г. Бубнов говорил, что хороших результатов при использовании предложенного им уравнения следует ожидать, если в качестве прототипа рассматривается реальное судно с типичными пропорциями [31].

Так как уравнение (4.14) содержит четыре неизвестных (δ , L , B , T), то приходится добавлять еще три зависимости для того, чтобы его можно было решить. Такие зависимости могут быть составлены по разным предположениям:

1. Наиболее простым предположением является сохранение постоянными отношений $\delta_p \sim L/B$; $\delta_T = B/T$, что приводит к выражениям $B = L/\delta_p$; $T = B/\delta_T = L/\delta_p \delta_T$; $\Delta B = \Delta L/\delta_p$; $\Delta T = -\Delta L/\delta_p \delta_T$.

И. Г. Бубнов считал возможным значение δ оставлять неизменным, т. е. $\Delta \delta = 0$. Подставляя указанные значения в (4.14), получим уравнение с одним неизвестным L .

Так решали систему уравнений, основанных из которых было (4.14), близка к решению последователи Бубнова.

2. В настоящее время изучение ходкости и устойчивости привело к установлению зависимости, связывающих эти свойства с размерениями и формой судна. Это позволило составить допол-

зительные к (4.14) уравнения, отражающие связь размеров и форм судна с упомянутыми свойствами.

Используя формулу (7.33), запишем

$$\Delta b_T = \frac{\delta + \delta\delta}{T + \Delta T} - \frac{\delta}{T} \approx b_T \left(\frac{\Delta\delta}{\delta} - \frac{\Delta T}{T} \right) =$$

$$= 6\Delta\bar{A} + \frac{1,74}{\sqrt{k_2 b_T - k_2 (\alpha/\delta + \delta)}} \Delta \left(k_2 b_T - k_2 \frac{\alpha}{\alpha + \delta} \right), \quad (4.15)$$

где $\Delta\bar{A}$ — изменение относительной метacentрической высоты.

Величина второго члена (4.15) будет иметь значение лишь при значительном изменении $k_T = H/T$, т. е. в случае необходимости увеличения жесткости проектируемого судна. В противном случае в правой части (4.15) остается только член $6\Delta\bar{A}$, учитывающий желательное изменение относительной метacentрической высоты.

Учитывая требования жесткости, рассматриваем приращение к δ . Приращение $\Delta\delta$ может быть вычислено в функции Δv и ΔL (см. таб. 7). Принимаем, например, для сухогрузного судна, имеющего $Fr < 0,26$, среднее значение δ по формуле (9.64):

$$\delta = 1,09 - \alpha \cdot Fr = 1,09 - 1,68 \frac{v}{\sqrt{gL}}$$

(здесь при v в узлах $\alpha = 0,87$; при v в метрах в секунду — 1,68), получаем

$$\Delta\delta \approx \delta\delta = \frac{\partial\delta}{\partial v} dv + \frac{\partial\delta}{\partial L} dL = -\alpha \cdot Fr \left(\frac{\partial v}{v} - \frac{1}{2} \frac{dL}{L} \right) \approx$$

$$\approx 1,68 Fr \left(\frac{\Delta v}{v} - \frac{1}{2} \frac{\Delta L}{L} \right) \quad (4.16)$$

здесь v — скорость в метрах в секунду.

Далее рассматриваем изменение относительной длины

$$l = L^2/\sqrt{V}.$$

$$\Delta l \approx dl = l \left[\frac{dL}{L} - \frac{1}{3} \left(\frac{dL}{L} + \frac{dV}{V} + \frac{dT}{T} + \frac{d\delta}{\delta} \right) \right] =$$

$$= l \left[\frac{2}{3} \frac{dL}{L} - \frac{1}{3} \left(\frac{dV}{V} + \frac{dT}{T} + \frac{d\delta}{\delta} \right) \right] \approx$$

$$\approx l \left[\frac{2}{3} \frac{\Delta L}{L} - \frac{1}{3} \left(\frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta T}{T} + \frac{\Delta\delta}{\delta} \right) \right].$$

По формуле (9.44) относительная длина связывается со скоростью: $l = c_0 v^2$. Отсюда

$$\Delta l \approx c_0 v^{2-1} \Delta v = 2l \frac{\Delta v}{v}.$$

В результате

$$\frac{2}{3} \frac{\Delta L}{L} - \frac{1}{3} \left(\frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta T}{T} + \frac{\Delta\delta}{\delta} \right) = \alpha \frac{\Delta v}{v}. \quad (4.17)$$

Решая (4.15), (4.16) и (4.17) совместно с (4.14), получаем ΔL , ΔV , ΔT и δ .

Главные элементы проектируемого судна будут $L_1 = L + \Delta L$; $B_1 = B + \Delta B$; $T_1 = T + \Delta T$; $\delta_1 = \delta + \Delta\delta$.

Новое значение водоизмещения $D_1 = \rho_0 \delta_1 L_1 B_1 T_1$.

Это водоизмещение D_1 будет несколько отличаться от полученного по формуле

$$D_1 = D_0 + \Delta D = D_0 + D_0 \left(\frac{\Delta\delta}{\delta} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta T}{T} \right),$$

которое менее точно.

4.6. Уточнение размеров, коэффициента общей полноты и водоизмещения

Как уже указывалось, после нахождения водоизмещения следует подсчитать нагрузку по разделам или даже более подробно, особенно если масса корпуса определяется по формулам, содержащим измерители и модули (см. табл. 2.3 или табл. 2.4).

После такого подсчета вследствие погрешности, частично связанной с существом самого метода (замени дифференциалы dL , dB , dT , $d\delta$ конечными приращениями ΔL , ΔB , ΔT , $\Delta\delta$), возникнет неуказка между водоизмещением D_1 и суммой масс $P_1(D_1) + P_{\text{мощ}}$. Эта неуказка может быть ликвидирована при повторном расчете по формуле (4.14) с введенным в нее ΔL_1 , ΔB_1 , ΔT_1 , $\Delta\delta_1$:

$$\left[\frac{D_1}{\delta_1} - \frac{\partial P_1(D_1)}{\partial \delta_1} \right] \Delta\delta_1 + \left[\frac{D_1}{L_1} - \frac{\partial P_1(D_1)}{\partial L_1} \right] \Delta L_1 +$$

$$+ \left[\frac{D_1}{B_1} - \frac{\partial P_1(D_1)}{\partial B_1} \right] \Delta B_1 + \left[\frac{D_1}{T_1} - \frac{\partial P_1(D_1)}{\partial T_1} \right] \Delta T_1 =$$

$$= P_1(D_1) + P_{\text{мощ}}(D_1) - D_1.$$

Поскольку погрешка в главном размере, как правило, весьма мала, можно ограничиться простейшими предположениями, например, решить задачу только при изменении одной из величин L , B , T , δ , а именно: δ или T . В первом случае

$$\Delta\delta = \frac{P_1(D_1) + P_{\text{мощ}} - D_1}{\frac{D_1}{\delta_1} - \frac{\partial P_1(D_1)}{\partial \delta_1}}$$

Составив подробную таблицу нагрузки, можно установить, нужно ли продолжать уточнение. Как правило, оно не требуется. Следует только сравнить неуказку с запасом водоизмещения. Если

неуязвима малю по сравнению с ней, то следует изменить запас доверия на величину полученной неуязвимости.

И. Г. Бубнов в своей работе [31] указал на возможность устранения весьма значительных неуязвок в водонемещении, когда размеры судна и его форма намечены из глас. Это можно сделать, сопоставив его с другими судами, созданными по предъявляемым к ним требованиям, или исходя из величин $\varphi_b, \delta, L, \delta_T$.

Полученные характеристики судна с принятыми L, B, T и δ могут быть сбалансированы после определения суммы масс $P_s(D_s)$ по известным формулам (см. гл. 2) с водонемещением D_s в результате назначения определенной величины P_{ms} . Поскольку $D_s = P_s(D_s) + P_{ms}$, то $P_{ms} = D_s - P_s(D_s)$. Заметим, что P_{ms} может быть даже отрицательной величиной.

В действительности требуется, чтобы независимые массы имели величину P_{ms} . Это приводит к уравнению, получаемому на основании (4.14):

$$\left[\frac{D_s}{\delta_b} - \frac{\partial P_s(D_s)}{\partial \delta_b} \right] \Delta \delta + \left[\frac{D_s}{L_s} - \frac{\partial P_s(D_s)}{\partial L_s} \right] \Delta L + \left[\frac{D_s}{\delta_s} - \frac{\partial P_s(D_s)}{\partial \delta_s} \right] \Delta \delta + \left[\frac{D_s}{T_s} - \frac{\partial P_s(D_s)}{\partial T_s} \right] \Delta T = P_{ms} - P_{ms}$$

Составив три дополнительных уравнения, о которых говорилось выше, получим δ, L, B, T .

Следует обратить внимание на то, что в правой части вышеприведенного уравнения исходят произвольные функции $P_s(D_s)$ по параметрам, поскольку эти параметры, соответствующие заданной норме и пр., не должны в рассматриваемом случае изменяться.

4.7. Вычисление приращения нагрузки при изменении размеров и формы судна. Коэффициенты Нормана при таких приращениях

Уравнение (4.14) содержит члены

$$\frac{\partial P_s(D_s)}{\partial \delta} \Delta \delta, \quad \frac{\partial P_s(D_s)}{\partial L} \Delta L, \\ \frac{\partial P_s(D_s)}{\partial B} \Delta B, \quad \frac{\partial P_s(D_s)}{\partial T} \Delta T,$$

представляющие собой изменения масс по разделам и статям нагрузки при изменении δ, L, B, T . Вычисляя, например, $\frac{\partial P_s(D_s)}{\partial \delta}$ с использованием зависимостей, приведенных в табл. 2.3 или 2.4, можно подсчитать, как изменится приращение масс судна с из-

менением параметра только по δ :

$$\Delta P_s(D_s) = \frac{\partial P_s(D_s)}{\partial \delta} \Delta \delta.$$

В частном случае такую операцию можно провести и для тех же параметров, но при изменении главных элементов:

$$\Delta P_s(D_s) = \frac{\partial P_s(D_s)}{\partial \delta} \Delta \delta.$$

Вопрос об изменении водонемещения в случае приращения масс, зависящих от D_s , а также независимых масс решался в 3.4. Ниже он рассматривается с учетом влияния на коэффициент Нормана изменения величин δ, L, B, T .

Приращение водонемещения может быть получено по формуле, аналогичной (3.21), только часть нагрузки, зависящей от D_s , будет функцией не водонемещения, а четырех величин: δ, L, B, T . Коэффициент Нормана η_n , представляющий собой отношение приращения водонемещения из-за увеличения размеров и коэффициента δ к приращению нагрузки протопла (без изменения его размеров и формы), вызванному приращением параметров δ, L, B, T и независимых масс P_{ms} (см. рис. 3.3):

$$\eta_n = \frac{\Delta D}{\Delta P(D_s) + \Delta P_{ms}}$$

Заменяя числитель и знаменатель в этой формуле с учетом формул (4.3), (4.13) и последующих, получим

$$\eta_n = \frac{(D_s/\delta) \Delta \delta + (D_s/L) \Delta L + (D_s/B) \Delta B + (D_s/T) \Delta T}{\left[\frac{D_s}{\delta} - \frac{\partial P_s(D_s)}{\partial \delta} \right] \Delta \delta + \left[\frac{D_s}{L} - \frac{\partial P_s(D_s)}{\partial L} \right] \Delta L + \left[\frac{D_s}{B} - \frac{\partial P_s(D_s)}{\partial B} \right] \Delta B + \left[\frac{D_s}{T} - \frac{\partial P_s(D_s)}{\partial T} \right] \Delta T} \quad (4.18)$$

Можно поставить вопрос, каков будет η_n , если изменение водонемещения обусловлено приращением только одной из четырех величин: L, B, T, δ .

Пусть изменяется только δ , тогда общее выражение (4.18) для η_n при $\Delta L = 0, \Delta B = 0, \Delta T = 0$ будет

$$\eta_n = \frac{D_s \delta}{\delta} \frac{1}{\frac{D_s}{\delta} - \frac{\partial P_s(D_s)}{\partial \delta} \frac{\delta}{D_s}} \quad (4.19)$$

Аналогично формуле (4.19) при изменении соответственно L, B, T получим

$$\eta_n = \frac{1}{1 - \frac{\partial P_s(D_s)}{\partial L} \frac{L}{D_s}}; \quad (4.20)$$

$$\eta_{\delta} = \frac{1}{1 - \frac{\partial P_1(D_{\delta})}{\partial \delta} \frac{\delta}{D_{\delta}}} \quad (4.21)$$

$$\eta_{\tau} = \frac{1}{1 - \frac{\partial P_1(D_{\tau})}{\partial \tau} \frac{\tau}{D_{\tau}}} \quad (4.22)$$

Из выражения (4.19) следует

$$\frac{1}{\eta_{\delta}} = 1 - \frac{\partial P_1(D_{\delta})}{\partial \delta} \frac{\delta}{D_{\delta}}$$

или

$$\frac{\partial P_1(D_{\delta})}{\partial \delta} = \frac{D_{\delta}}{\delta} \left(1 - \frac{1}{\eta_{\delta}}\right) \quad (4.23)$$

Таким же образом из формул (4.20), (4.21), (4.22) получаем

$$\frac{\partial P_1(D_{\delta})}{\partial L} = \frac{D_{\delta}}{L} \left(1 - \frac{1}{\eta_L}\right); \quad (4.24)$$

$$\frac{\partial P_1(D_{\delta})}{\partial B} = \frac{D_{\delta}}{B} \left(1 - \frac{1}{\eta_B}\right); \quad (4.25)$$

$$\frac{\partial P_1(D_{\delta})}{\partial \tau} = \frac{D_{\delta}}{\tau} \left(1 - \frac{1}{\eta_{\tau}}\right) \quad (4.26)$$

Подставляя выражения (4.23), (4.24), (4.25), (4.26) в формулу (4.19), получаем зависимость общего коэффициента Нормана от частных коэффициентов η_{δ} , η_L , η_B , η_{τ} :

$$\eta_{\delta} = \frac{\Delta \delta \delta + \Delta L L + \Delta B B + \Delta \tau \tau}{\frac{1}{\eta_{\delta}} \frac{\delta \delta}{\delta} + \frac{1}{\eta_L} \frac{\Delta L L}{L} + \frac{1}{\eta_B} \frac{\Delta B B}{B} + \frac{1}{\eta_{\tau}} \frac{\Delta \tau \tau}{\tau}} \quad (4.27)$$

Таким образом, общий коэффициент Нормана зависит от частных коэффициентов и от соотношения относительных приращений $\Delta \delta \delta$, $\Delta L L$, $\Delta B B$, $\Delta \tau \tau$. Изменяя относительные приращения, сумма которых $\Delta D/D$, можно получить значения η_{δ} . Желательно, чтобы изменялась та из величин δ , L , B , τ , которой соответствует минимальный коэффициент Нормана. Однако следовать этому правилу не всегда возможно, так как разные обстоятельства, учитываемые при проектировании, влияют односторонне на величину η_{δ} (например, увеличение η_{δ} за счет одного $\Delta \tau$ может привести к уменьшению остойчивости и сделать судно непригодным для использования на линиях с ограниченной глубиной портов и каналов).

Тем не менее частные коэффициенты Нормана указывают, какие размерности предпочтительнее изменять с точки зрения получения минимального водоизмещения проектируемого судна.

Как правило, η_{δ} всегда является наименьшим. Для тихоходных судов η_{δ} имеет меньшие значения, а η_L — максимальные; для быстроходных судов — наоборот.

Если принять $\frac{\Delta \delta}{\delta} = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta B}{B} = \frac{\Delta \tau}{\tau}$, то

$$\eta_{\delta} = \frac{4}{\frac{1}{\eta_{\delta}} + \frac{1}{\eta_L} + \frac{1}{\eta_B} + \frac{1}{\eta_{\tau}}}$$

или

$$\frac{1}{\eta_{\delta}} = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{\eta_{\delta}} + \frac{1}{\eta_L} + \frac{1}{\eta_B} + \frac{1}{\eta_{\tau}} \right),$$

т. е. общий коэффициент Нормана η_{δ} является средней гармонической из четырех коэффициентов η_{δ} , η_L , η_B , η_{τ} .

Если при определении водоизмещения считать

$$L_{\delta} = \frac{L}{\delta} = \frac{L + \Delta L}{B + \Delta B};$$

$$\delta_{\tau} = \frac{\delta}{\tau} = \frac{B + \Delta B}{\tau + \Delta \tau}; \quad \delta_1 = \delta_{\delta}$$

тогда

$$\eta_{\delta} = \frac{3}{\frac{1}{\eta_{\delta}} + \frac{1}{\eta_L} + \frac{1}{\eta_{\tau}}} \quad (4.28)$$

Некоторые подсчеты показывают, что коэффициенты η_{δ} , вычисленные по формулам (4.28) и (3.20), близки друг к другу.

4.8. О точности формул, включающих малые приращения величин

Точность результатов вычислений по формулам типа зависимости (4.13) подробно не исследовалась.

Существуют основания, что формулы (4.14) точны, основанные на том, что функции масс здесь являются результатом суммирования ряда слагаемых, значения которых взаимно противоположны. В то же время имеются рекомендации, касающиеся ограничения зрительной погрешности, особенно строгие, при переходе от прототипа к проектируемому судну, обуславливающие стремление обеспечить точность при расчетах по формулам типа (4.14). Рекомендуются следующие ограничения при использовании этих формул:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta \delta}{\delta} = \frac{\Delta \tau}{\tau} \leq 0,1; \quad \frac{\Delta D}{D} \leq 0,20.$$

Сказав о том в виду, что увеличение результатов из второй приближенной (см. 4.5), так же как увеличение минимальной и максимальной по устойчивости и ходкости (см. 4.4) за результат, могут расширить указанные пределы*.

* Автор в случае, когда $\Delta D \rightarrow D_{\delta}$, вывел из результата процесса, описанного в 4.5—4.6, приведенной только формулу.

Примеры ускорения точности при замене дифференциала комплексного выражения может быть выведены при помощи связи между $\Delta\delta$, ΔL , ΔB и ΔT .

В том случае $D_0 = \rho_0 \delta L B T$; $D_1 = \rho_0 \delta L_1 B_1 T_1 = \rho_0 \delta (B + \Delta B) \times (L + \Delta L) (B + \Delta B) (T + \Delta T)$.

Точное значение выражения возмущения при $\Delta\delta$, ΔL , ΔB , ΔT :

$$\Delta D = D_1 - D_0 = \rho_0 \delta (B + \Delta B) (L + \Delta L) (B + \Delta B) (T + \Delta T) - \rho_0 \delta L B T. \quad (4.29)$$

Относительное выражение

$$\delta = \frac{\Delta D}{D} = \frac{\rho_0 \delta (B + \Delta B) (L + \Delta L) (B + \Delta B) (T + \Delta T) - \rho_0 \delta L B T}{\rho_0 \delta L B T} = \left(1 + \frac{\Delta\delta}{\delta}\right) \left(1 + \frac{\Delta L}{L}\right) \left(1 + \frac{\Delta B}{B}\right) \left(1 + \frac{\Delta T}{T}\right) - 1. \quad (4.30)$$

То же выражение по приближенной формуле (4.13)

$$\Delta_0 = \frac{\Delta\delta}{\delta} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta T}{T}.$$

Тогда разность между (4.30) и (4.13)

$$\bar{\delta} = \Delta - \Delta_0 = \left(1 + \frac{\Delta\delta}{\delta}\right) \left(1 + \frac{\Delta L}{L}\right) \left(1 + \frac{\Delta B}{B}\right) \left(1 + \frac{\Delta T}{T}\right) - \left(1 + \frac{\Delta\delta}{\delta} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta T}{T}\right). \quad (4.31)$$

По выражению (4.31) могут быть вычислены $\bar{\delta}$ при разных значениях $\Delta\delta/\delta$, $\Delta L/L$, $\Delta B/B$, $\Delta T/T$.

Чтобы устранить возможность появления малой разности больших величин, выражение (4.31) следует преобразовать:

$$\begin{aligned} \bar{\delta} = & 1 + \frac{\Delta\delta}{\delta} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta T}{T} + \frac{\Delta\delta}{\delta} \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta T}{T}\right) + \\ & + \frac{\Delta L}{L} \left(\frac{\Delta\delta}{\delta} + \frac{\Delta T}{T}\right) + \frac{\Delta B}{B} \frac{\Delta T}{T} + \frac{\Delta\delta}{\delta} \frac{\Delta L}{L} \left(\frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta T}{T}\right) + \\ & + \frac{\Delta B}{B} \frac{\Delta T}{T} \left(\frac{\Delta\delta}{\delta} + \frac{\Delta L}{L}\right) + \frac{\Delta\delta}{\delta} \frac{\Delta L}{L} \frac{\Delta B}{B} \frac{\Delta T}{T} - \\ & - \left(1 + \frac{\Delta\delta}{\delta} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta T}{T}\right). \end{aligned}$$

Таким образом,

$$\begin{aligned} \bar{\delta} = & \frac{\Delta\delta}{\delta} \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta T}{T}\right) + \frac{\Delta L}{L} \left(\frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta T}{T}\right) + \frac{\Delta B}{B} \frac{\Delta T}{T} + \\ & + \frac{\Delta\delta}{\delta} \frac{\Delta L}{L} \left(\frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta T}{T}\right) + \frac{\Delta B}{B} \frac{\Delta T}{T} \left(\frac{\Delta\delta}{\delta} + \frac{\Delta L}{L}\right) + \\ & + \frac{\Delta\delta}{\delta} \frac{\Delta L}{L} \frac{\Delta B}{B} \frac{\Delta T}{T}. \end{aligned}$$

Примем, что все выражения, не равные нулю, являются одинаково, причем последовательно рассматриваются: четыре, три, два, одно (табл. 4.1). Система, что

$$1) \frac{\Delta\delta}{\delta} = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta B}{B} = \frac{\Delta T}{T} = \alpha,$$

тогда $\bar{\delta} = 6\alpha^2 + 4\alpha^3 + \alpha^4$;

2) одно выражение равно нулю ($\Delta\delta\delta = 0$); при остальных выражениях, равных α : $\bar{\delta} = 3\alpha^2 + \alpha^3$;

3) два выражения равны нулю и остальные равны α : $\bar{\delta} = \alpha^2$;

4) три выражения равны нулю, одно равно α : $\bar{\delta} = 0$.

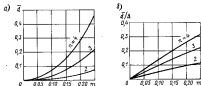


Рис. 4.1. Относительная погрешность при определении величины возмущения: α — по формуле (4.31); δ — относительная погрешность [соотношение между (4.31) и (4.30)].

Построенный на основании табл. 4.1 график (рис. 4.3) показывает быстрое уменьшение точности расчета по приближенной формуле по сравнению с точной формулой (4.30). Однако не следует предвзирать. Большого значения

Таблица 4.1

ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ $\bar{\delta}$ И $\bar{\delta}/\Delta$ ПРИ РАСЧЕТЕ ПО ФОРМУЛЕ (4.31)

α	Число выражений α , равных α								
	4			3			2		
	$\bar{\delta}$	Δ	$\bar{\delta}/\Delta$	$\bar{\delta}$	Δ	$\bar{\delta}/\Delta$	$\bar{\delta}$	Δ	$\bar{\delta}/\Delta$
0,05	0,8125	0,22	0,070	0,0876	0,16	0,047	0,0025	0,106	0,034
0,10	0,8641	0,46	0,139	0,0310	0,20	0,094	0,0100	0,219	0,048
0,15	0,1493	0,75	0,199	0,0700	0,32	0,136	0,0225	0,330	0,070
0,20	0,2736	1,07	0,255	0,1280	0,75	0,176	0,0400	0,444	0,090
0,25	0,4414	1,43	0,308	0,2031	0,95	0,214	0,0625	0,560	0,112

этому, так как возможность проверки результатов определения главных размеров по емкости влечет за собой и необходимость дать возможность автору расчета в следующем приближении.

Более того, проектировщик может уточнить нагрузку судна по полученным размерам любым способом, например, сначала выбрать корпус по Правилам Регистра, рассчитать мощность $20'$ и выбрать реальные механизмы, а затем, составив нагрузку судна, имеющего данные размеры, и установив равность между подвешиванием (по главным размерам в $6'$), сделать еще одно приближение. В данном случае можно применять формулу, которая была рассмотрена в 4.5.

5

ВМЕСТИМОСТЬ

5.1. Полная теоретическая емкость судна

Одной из важных задач, стоящих перед проектировщиками судна, является задача обеспечения объема, необходимых для размещения груза, механизмов, жилых помещений, помещений

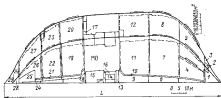


Рис. 5.1. Эпюра емкости суднообразного корпуса:
1 — внутреннее переборка; 2 — жилой ящик; 3 — закладка; 4, 7, 11, 13, 22, 25 — трюмы;
5, 6, 12, 16, 21, 27 — твиндек; 8, 9, 15, 18 — полубат; 10, 21 — дельта; 14 — склепка
палубы; 14 — колодезь воды; 16, 17 — корабельная; 18 — топливный ящик; 23 — рубка;
25 — балласт; 28 — каботажный ящик.

управления судном, цистерн для запасов топлива, балласта и т. д., а на промышленных судах — помещений производственно-технологического оборудования. На кораблях кроме указанных должны предусматриваться еще помещения для вооружения, боезапаса и пр.

Различные численные характеристики емкости не являются в таком объеме, как по нагрузке судна; наоборот, это касается транспортных судов, хотя для каждого из них обязательно строится эпюра емкости (рис. 5.1), аналогичная строится по шпангоутам, показывающая площадь сечений помещений в шпангоутной плоскости. Анализ таких эпюр способствует выполнению данных по емкости.

Эквивалентность показывает, как распределяется вместимость по длине судна. Распределение вместимости по высоте характеризует стрелая по ВЛ, прообразинная так, чтобы охватить и надводные объемы судна. Ее роль в рассмотрении теоретической вместимости судна особенно велика.

Полная теоретическая вместимость помещений судна и предел, ограниченных теоретическими линиями корпуса, надстроек и рубок:

$$V = V + W_a + W_p, \quad (5.1)$$

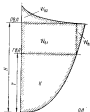


Рис. 5.2. Стрелая по ватерлинии, длина ее 20 верхней точки осадности.

где V — объем водозмещения по расчету ватерлинии, м³; W_a — объем (теоретическая вместимость) основного корпуса над расчетной ВЛ, м³; W_p — объем (теоретическая вместимость) надстроек и рубок, м³.

Из ватерлинии W можно выделить объем основного корпуса (без надстроек и рубок)

$$W_a = V + W_p, \quad (5.2)$$

Объем W_a (рис. 5.2) можно разбить на три части:

$$W_a = W_{a1} + W_{a2} + W_{a3}, \quad (5.3)$$

где W_{a1} — объем судна между КВЛ и параллельной ей ватерлинией, проделанной на уровне нижней точки раскатки палубы (ПВЛ) без учета развала бортов; W_{a2} — объем, образующийся в результате развала бортов в надводной части; W_{a3} — объем, получающийся за счет седловатости и погниби палубы.

При этом

$$W_{a1} = S(H-T); \quad (5.4)$$

$$W_{a2} = k_{a2}(H-T)(S_2-S) = k_{a2}S(H-T)\left(\frac{S_2}{S}-1\right); \quad (5.5)$$

$$W_{a3} = k_{a3}H_0S_{a1}, \quad (5.6)$$

где k_{a2} и k_{a3} — коэффициенты галлюты объемов W_{a2} и W_{a3} ; S — площадь КВЛ; S_2 — площадь ПВЛ; H_0 — максимальная аппликат седловатости.

Рассмотрев основную часть вместимости надводной части между КВЛ и ПВЛ, можем записать

$$W_{a11} = W_{a1} + W_{a2} = S(H-T)\left[1 + k_{a2}\left(\frac{S_2}{S}-1\right)\right] - k_{a21}S(H-T). \quad (5.7)$$

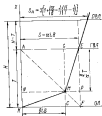


Рис. 5.3. Стрелая по ватерлинии в форме четырехугольника Морриса.

В формуле (5.7) коэффициент, учитывающий влияние развала бортов,

$$k_{a21} = 1 + k_{a2}\left(\frac{S_2}{S}-1\right) \quad (5.8)$$

и может быть найден из рассмотрения данных по построенным судам (стрелая по ватерлинии и т. д.).

Некоторые авторы пытались определить его, считая, что стрелая по ватерлинии в надводной части судна выражается одинаковым аналитическим законом. Если взять за стрелую четырехугольник Морриса, то получим (рис. 5.3).

$$\frac{S_2 - S}{H - T} = \frac{\alpha - \beta}{\Delta \alpha} \frac{L B}{T} = \left(\frac{\alpha}{\beta} - 1\right) \frac{S}{T}, \quad (5.9)$$

или

$$\frac{S_2 - S}{S} = \left(\frac{\alpha}{\beta} - 1\right) \left(\frac{H}{T} - 1\right). \quad (5.10)$$

Тогда

$$W_{a11} = \frac{1}{2}(S_2 - S)(H - T) = \frac{S}{2}(H - T) \left(\frac{\alpha}{\beta} - 1\right) \left(\frac{H}{T} - 1\right). \quad (5.11)$$

Срещивая (5.11) с (5.5), получаем для данного случая $k_{s2} = 1/2$. Таким образом, W_{s2} определяется количеством S , H , T и коэффициентами поправки α и δ . Если принять, как это делает В. Л. Подорожня, что площади надводной ватерлинии соответствуют параболической стропе (см. 6.7):

$$S_2 = \frac{S}{\gamma \cos \delta - 1} \varepsilon^{1+\delta} - 1, \quad (5.12)$$

и разложить S_2 в ряд Маклорена, сохраняя в нем два члена, то получим те же формулы, что и ранее (см. выражения (5.9), (5.10), (5.11)).

Если W_{s2} будем вычислять по выражению (5.11), то (5.7) можно записать так:

$$W_{s2} = S(H-T) \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\delta} - 1 \right) \left(\frac{H}{T} - 1 \right) \right].$$

Рядом авторов выражение для объема W_{s12} принималось именно в таком виде, но, поскольку формы стропы в надводной и подводной частях судна могут значительно отличаться друг от друга, лучше основывать расчеты непосредственно на формулах (5.4) и (5.7).

Учитывая зависимости (5.6) и (5.7), получаем из (5.2)

$$\begin{aligned} W_s &= S(H-T) \left[k_{s2} + k_{s1} \frac{H_2}{H-T} \frac{S_2}{S} \right] = \\ &= S(H-T) \left[1 + k_{s2} \left(\frac{S_2}{S} - 1 \right) + k_{s1} \frac{H_2}{H-T} \frac{S_2}{S} \right] = \\ &= S(H-T)(1 + k_d). \end{aligned} \quad (5.13)$$

Здесь коэффициент $k_d = k_{s2} \left(\frac{S_2}{S} - 1 \right) + k_{s1} \frac{H_2}{H-T} \frac{S_2}{S}$ может быть вычислен для конкретного судна, в том числе для прототипа, и учтен при расчете вместимости.

По данным Э. Арента, для пассажирских судов, глубина которых имеет погрешность и седловатость, $k_d = 0,28 \pm 0,07$; без пошиб и седловатости $k_d = 0,22$. Для судов иного назначения k_d , как правило, не превосходит указанных значений.

Подставляя в выражение (5.2) W_s по формуле (5.13), можно записать

$$\begin{aligned} W_{s1} &= V + S(H-T)(1 + k_d) = V \left[1 + \frac{S}{V} (H-T)(1 + k_d) \right] = \\ &= V \left[1 + \frac{\alpha}{\delta} \left(\frac{H}{T} - 1 \right) (1 + k_d) \right]. \end{aligned} \quad (5.14)$$

Как показывает анализ формулы (5.14), теоретическая вместимость основного корпуса прямо пропорциональна возмущению судна; она растет с увеличением отношения $k_T = H/T$, величина k_d ,

с увеличением влияния развала бортов в надводной части судна, седловатости и пошиба палубы и уменьшается с увеличением коэффициента вертикальной пошибы $\chi = \delta/\alpha$.

Следует добавить, что при данном возмущении наиболее эффективным средством увеличения полезной вместимости судна является увеличение полезной высоты бортов при неизменной осадке.

Изменения $\chi = \delta/\alpha$ и k_d , а следовательно, и их влияние ограничены при значительном изменении формы обводов по сравнению с обводами, хорошо зарекомендовавшими себя в эксплуатации. Однако некоторые влияние этих факторов тоже может оказаться существенным. В результате суда, требующие большой относительной вместимости W_{s1}/V , должны иметь большие отношения k_T и значительный развал бортов.

Вместимость может быть увеличена и за счет объема надстроек и рубок W_p .

Полная теоретическая вместимость судна с учетом формулы (5.1):

$$W = V \left[1 + \frac{\alpha}{\delta} \left(\frac{H}{T} - 1 \right) (1 + k_d) \right] + W_p,$$

или

$$W = V \left[1 + \frac{\alpha}{\delta} \left(\frac{H}{T} - 1 \right) (1 + k_d) + \frac{W_p}{V} \right]. \quad (5.15)$$

Принимая коэффициент развита надстроек и рубок

$$w_p = \frac{W_p}{W_s} = \frac{W_p}{V \left[1 + \frac{\alpha}{\delta} \left(\frac{H}{T} - 1 \right) (1 + k_d) \right]},$$

получаем

$$W = (1 + w_p) V \left[1 + \frac{\alpha}{\delta} \left(\frac{H}{T} - 1 \right) (1 + k_d) \right]. \quad (5.16)$$

По данным Э. Арента, для пассажирских судов w_p колеблется от 0,25 (у железнодорожных паромов) до 1 (у больших пассажирских лайнеров и круизных судов). Эти данные, а также [73], показывают, какую значительную роль могут играть надстройки в обеспечении вместимости судна.

А. В. Давыдов, исследовавший вместимость средней надстройки (рубки) современных судогрузных судов, дал основания для определения ее объема в зависимости от численности экипажа [41]. Приведем эти данные, позволяющие считать, что объем надстройки (рубки), совершающей каботаж экипажа, санитарные и служебные помещения у судов с количеством экипажа $n > LB/75$ $w_p = -(1 \pm 0,02) \cdot 0,45 LB$, а при $n < LB/75$ $w_p = (1 \pm 0,02) \cdot 45 n$. Каботаж займут 0,33 всего объема W_p .

Не следует забывать, что с ростом $k_0 = H/T$ и W_0/V повышается аппликация ЦТ судна и ухудшается начальная устойчивость, вследствие чего может потребоваться увеличение B . Поэтому окончательно эти величины могут быть приняты после рассмотрения устойчивости проектируемого судна (см. гл. 7).

5.2. Уравнение объемов (вместимости). Определение отношения полной высоты борта к осадке

В. Л. Поджени предложил уравнение объемов для обеспечения проектируемому судну необходимой вместимости [73]:

$$W = \Sigma F_i, \quad (5.17)$$

где W — теоретический объем корпуса судна с надстройками и рубками, определенный его размерами и формой; ΣF_i — сумма теоретических объемов всех помещений судна; в нее входят объемы: грузовой помещений W_g ; пассажирских помещений W_p ; помещений команды $W_{ком}$; помещений энергетической установки W_e ; топливных цистерн (бузирнов) W_t ; помещенийalex-траспаший W_a ; судовых мастерских (для судовых нужд) $W_{мст}$; судовых кладовых $W_{кл}$; запасных помещений, пустых помещений, т. е. запасной объем — запас вместимости W_z ; постои управления судном и других служебных помещений W_s ; балластных цистерн $W_{бц}$.

Этот перечень является примерным для транспортных судов. В ряде случаев объемы могут быть сгруппированы иначе, например, из них выделяются объемы тех помещений, которые будут размещены в надстройках.

К перечню объемов помещений, приведенному выше, может быть добавлен для экспериментальных, научно-исследовательских судов объем помещений для лабораторий $W_{л}$.

Из перечня объемов помещений кораблей исключаются некоторые помещения, но дополнительно учитываются объемы помещений для размещения вооружения внутри корпуса $W_{во}$, балласта $W_{бл}$ и т. д. Здесь, так же как и выше, рубрика на группы может быть иной, например, $W_{вп}$ может быть включен частично в объемы надстроек и рубок.

Для промысловых судов вводятся объемы производственно-технических помещений $W_{пт}$.

Еще раз отметим, что в зависимости от назначения судна в перечень могут включаться новые и новые группы помещений разных категорий.

Назначаемые объемы зависят от требований к размещению груза, механизма, топлива и т. п. Эти требования выражаются как соответствующими величинами удельной вместимости, так и другими характеристиками. Например, для промышленного судна

в соответствии со сказанным выше

$$W = \Sigma W_i = W_g + W_{ком} + W_p + W_e + W_t + W_{мст} + W_{кл} + W_z + W_s + W_{л} + W_{пт} + W_{во} + W_{бл} \quad (5.18)$$

Здесь $W_g = \mu_g P_g = \mu_g \rho_g \gamma V$; μ_g — удельная грузоемкость, т. е. отношение объема грузовых помещений к расчетной массе перевозимого в них груза; P_g — расчетная грузоподъемность судна; $W_{ком} = \mu_{ком} N$; $\mu_{ком}$ — удельный объем командных помещений, т. е. теоретический объем всех помещений для размещения и бытового обслуживания команды и рабочих, приходящийся на одного человека; N — общее количество людей; $W_t = \mu_t V$; μ_t — удельный объем помещений ЦВ. Принимая $N = V^m \rho^k / C$, получим

$$W_{ком} = \mu_{ком} \frac{V^m \rho^k}{C}$$

Объем топливных цистерн

$$W_t = \frac{k_0 h_0 \rho_0}{\rho_0 h_0} N \frac{r}{z} = \frac{k_0 h_0 \rho_0}{\rho_0 h_0} \frac{V^m \rho^k}{C} r,$$

где ρ_0 — плотность топлива; $k_0 z$ — коэффициент заполнения топливных цистерн (остальные обозначения см. в 3.1).

Объемы $W_{во}$, $W_{бл}$, $W_{л}$, $W_{пт}$, W_s можно связать с размерами судна, считая их пропорциональными V : $W_{во} = a_{во} V$; $W_{бл} = a_{бл} V$; $W_{л} = a_{л} V$; $W_{пт} = a_{пт} V$; $W_s = a_s V$.

Объем, требуемый для балластирования судна (чисто балластные цистерны), $W_{бц} = (q_{бл}/k_{бл}) V$, где $q_{бл}$ — коэффициент, определяющий, какую долю от V составляет объем балластной воды; $k_{бл}$ — коэффициент заполнения балластных цистерн.

Теперь можно записать уравнение (5.18) в виде

$$W = (\mu_g \rho_g + a_{во} + a_{бл} + a_s + a_{л} + a_{пт} + a_s + \frac{q_{бл}}{k_{бл}}) V + \left(\frac{\mu_{ком} \rho^k}{C} + \frac{k_0 h_0 \rho_0 r \rho^k}{\rho_0 h_0 C} \right) V^m + W_{ком} + W_{пт} \quad (5.19)$$

или

$$W = W(V) + W_{ком}$$

где $W(V)$ — вместимость, зависящая от V ; $W_{ком}$ — независимая вместимость.

Величина $W_{ком}$ определяется до решения уравнения вместимости. В нее может входить, например, объем помещений, необходимых для размещения команды или производственного и технологического оборудования, и др. Возможны и другие варианты состава $W_{ком}$ в зависимости от назначения судна.

Общее выражение уравнения объемов (вместимости) будет иметь следующий вид:

$$V \left[1 + \frac{a}{k} (1 + k_0) \left(\frac{H}{T} - 1 \right) + \frac{W_0}{V} \right] = W(V) + W_{ком} \quad (5.20)$$

Графическое изображение входящих в него функций и схема его решения показаны на рис. 5.4.

В случае размещения палуб управления и надстроек или рубок из $W(V)$ исключаются $\alpha_1 V$, а из (5.20) — $W_{\text{пр}} V$ и уравнение вместимости приобретает вид

$$V \left[1 + \frac{\alpha}{\delta} (1 + k_0) \left(\frac{H}{T} - 1 \right) \right] = (\alpha_2 \rho_b V + \alpha_3 + \alpha_{\text{мв}} + \alpha_{\text{ка}} + \alpha_4 + \frac{3\alpha_5}{\delta \rho_b}) V + \left(\frac{W_{\text{пр}}}{C} + \frac{k_0 k_1 \rho_b C^{m-1} V}{\rho_b k_0 C} \right) V^m + W_{\text{пр}} + W_{\text{мв}} \quad (5.21)$$

Задав $H_T = H/T$, k_0 , α/δ , мы можем получить уравнение, из которого определяется V .



Рис. 5.4. Графическое решение уравнения вместимости.

$W_{\text{пр}}$ — кривая, соответствующая левой части уравнения (5.20); $W_{\text{мв}}$ — прямая, соответствующая правой части уравнения (5.21).

Приним, например, $m = 1/2$, приведем уравнение (5.21) к квадратному. Решив его, получим объемное водозмещение, при котором обеспечивается заданная вместимость судна.

Вид уравнения вместимости определяется названием судна. При изменении зависимости мощности от водозмещения оно может оказаться, например, кубическим или таким, при котором практически приемлемым будет только графическое его решение.

После нахождения из уравнения вместимости V следует сравнить его с водозмещением V_0 , полученным из уравнения нагрузки. При этом возможны три случая:

- 1) $V = D/\rho_b$; $(D/\rho_b) - V = 0$;
- 2) $V < D/\rho_b$; $(D/\rho_b) - V > 0$;
- 3) $V > D/\rho_b$; $(D/\rho_b) - V < 0$.

В первом случае результаты решения уравнений вместимости и нагрузки совпадают; во втором — имеется свободный объем, поэтому следует проверить возможность его рационального использования; а третьим — необходимо водозмещение и вместимость привести в соответствие. Для этого должен быть рассмотрен вопрос об использовании надстроек и о возможности удлинения оплечий H/T и α/δ .

Величина $H_T = H/T$ имеет особо важное значение в процессе обеспечения вместимости, поэтому целесообразно специально рассмотреть ее определение при совместном решении уравнения нагрузки и уравнения объема.

Как известно, решение уравнения нагрузки позволяет найти водозмещение судна. Соответствующая ему величина $V = D/\rho_b$ может быть подставлена в уравнение (5.20). В результате получается

$$\frac{\alpha}{\delta} \left(\frac{H}{T} - 1 \right) (1 + k_0) = \frac{W(V)}{V} + \frac{W_{\text{мв}}}{V} - \frac{W_{\text{пр}}}{V} - 1;$$

откуда

$$H_T = \frac{H}{T} - 1 + \frac{\delta \alpha}{1 + k_0} \left[\frac{W(V)}{V} + \frac{W_{\text{мв}}}{V} - \frac{W_{\text{пр}}}{V} - 1 \right]. \quad (5.22)$$

Если известны V и вид зависимости $W(V)$, то выражение в скобках вычисляется без затруднений.

После определения H_T по формуле (5.22) следует сравнить разность $H_{\text{ка}} = H - T$, т. е. высоту надводного борта, с требуемой для большинства гражданских судов правилами классификационных обществ (например, Правилами о грузовой марке Регистра СССР — см. гл. 8).

В зависимости от величины второго члена правой части (5.22) значение H_T может стать больше требуемого правилами, т. е.

$$H_T = \frac{H}{T} > \frac{T + H_{\text{ка}}}{T} = 1 + \frac{H_{\text{ка}}}{T}.$$

Суда, для которых справедливо данное неравенство, называются судами с избыточным надводным бортом.

5.3. Коэффициент приращаения объемного водозмещения при изменении вместимости

На рис. 5.5 изображены кривые требуемой вместимости в функции водозмещения для прототипа [$W_{\text{пр}}(V)$ и $W_{\text{мв}}(V)$] и проекта, [$W_1(V)$ и $W_{\text{мв}1}$].

Водозмещение V_0 соответствует на рис. 5.5 точка A_0 пересечения прямой

$$V \left[1 + \frac{\alpha}{\delta} \left(\frac{H}{T} - 1 \right) (1 + k_0) + \frac{W_{\text{пр}}}{V} \right]$$

с кривой $W_{\text{мв}}(V) + W_{\text{мв}1}$.

При $W_1(V_0)$ и $W_{\text{мв}1}$ образуется недостаток вместимости судна: $\Delta W(V_0) + \Delta W_{\text{мв}} = W_1(V_0) - W_0(V_0) + W_{\text{мв}1} - W_{\text{мв}}$.

Для точки A_1 можно записать

$$\Delta W(V_0) + \Delta W_{\text{мв}} + \Delta V \frac{dW_1(V)}{dV} - \Delta V \left[1 + \frac{\alpha}{\delta} \left(\frac{H}{T} - 1 \right) \times \right. \\ \left. \times (1 + k_0) + \frac{W_{\text{пр}}}{V} \right]. \quad (5.23)$$

Из выражения (5.23) выходя коэффициент коррекции объемного водозаполнения при изменении требуемой вместимости:

$$\eta_c = \frac{\Delta V}{\Delta F (V_0 + \Delta F_{\text{св}})} = \frac{1}{1 + \frac{\alpha}{\delta} (1 + \lambda_0) \left(\frac{H}{T} - 1 \right) + \frac{W_p}{V} - \frac{\epsilon F_1 (V)}{dF}} \quad (5.24)$$

Л. Г. Соколов [85], предложивший этот коэффициент, показал, что четвертый член знаменателя правой части уравнения обычно

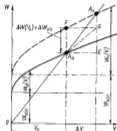


Рис. 5.5. Изменение объемного водозаполнения при изменении вместимости.

меньше суммы второго и третьего κ , таким образом, $\eta_c < 1$, в отличие от коэффициента Нормана η_n , который всегда больше единицы.

В тех случаях, когда вместимость по разделам растет пропорционально только соответствующим массам, например грузоместность пропорциональна грузоподъемности, вместимость вполне обеспечивается при одновременном увеличении водозаполнения, соответствующем η_n . Тем не менее следует при переходе от прототипа к проекту учесть изменения, вызываемые наличием обих коэффициентов η_n и η_c , а также характеристик и требований, касающихся масс и требуемых объемов. Такой учет необходим потому, что специальные требования по характеристикам вместимости (например, удельная грузоместность или объем помещений, приходившийся на одного пассажира) могут значительно измениться. В этом случае ΔV должно быстро увеличиваться из-за изменения $F_1(V_0) + F_{\text{св},1}$, при этом приращение нагрузки может оказаться небольшим. Тогда целесообразнее менять значение λ_1 , которое

при определении λ_0 считалось постоянным. Изменение λ_1 , как правило, может сводиться на $\lambda_1 = H/T$, что связано с обеспечением остойчивости (см. гл. 7).

5.4. Уравнение вместимости сухогрузных судов со средним расположением машинного отделения

Приведенные выше исследования носят общий характер, и результаты их могут применяться при определении вместимости судов довольно разнообразных архитектурно-конструктивных ти-

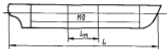


Рис. 5.6. Схема сечения сухогрузного судна в средней части.

Рис. 5.7. Поперечное сечение саббатубного сухогрузного судна.



пов. В то же время для судов отдельных архитектурно-конструктивных типов можно дать более конкретные решения и к тому же выяснить одновременно вопросы дифференциации. Так, Л. М. Ногодом было выведено специальное уравнение вместимости для сухогрузных судов, базирующееся на рассмотрении объема (вместимости) грузовых помещений [62, 64]. Особенно просто составляется это уравнение в случае расположения ЭВ в середине длины судна* (рис. 5.5 и 5.7).

Обозначим длину машинного отделения (МО) через L_m .

Объем, заключенный между открытой палубой и ватсоном двойного дна: $W_{\text{св}} = \delta_m L B H_{\text{св}}$, где δ_m — коэффициент палубы теоретического объема $W_{\text{св}}$, отнесенный к $L B H_{\text{св}}$; $H_{\text{св}}$ — глубина трюма от кромки открытой палубы до палубы второго дна.

* Л. М. Ногодом изложил этот вопрос несколько иначе.

К объему $W_{\text{св}}$ могут быть добавлены объемы между конингсами люков, выступающими над открытой палубой. Под терминем закрытая палуба подразумевается как верхняя палуба, так и шлюз-тердек.

Исключая из объема $W_{\text{св}}$ объемы шлюзов, цистерн разного назначения (кроме цистерн в районе МО), коридора гребного вала и т. п. и считая, что исключенные объемы составляют величину $(1 - k_{\text{св}}) W_{\text{св}}^*$, получаем теоретический объем грузовых помещений и МО (с цистермами в районе МО):

$$W_T = k_{\text{св}} \delta_{\text{св}} L B H_{\text{св}} \quad (5.25)$$

Выключая в отсек МО помимо помещений, в которых размещена СУ, еще и топливные цистерны в районе МО, можем считать объем МО

$$W_M = \delta_M L_M B H_{\text{св}} \quad (5.26)$$

где δ_M — коэффициент полноты МО.

Отсюда объем грузовых трюмов для судна со средним расположением СУ

$$W_T = W_T - W_M = \left(\delta_{\text{св}} k_{\text{св}} - \delta_M \frac{L_M}{L} \right) L B H_{\text{св}}$$

или

$$W_T = \left(\delta_{\text{св}} k_{\text{св}} - \delta_M \frac{L_M}{L} \right) L B (H - H_{\text{св}}) \quad (5.27)$$

где $H_{\text{св}}$ — высота двойного дна.

Уравнение (5.27), полученное Л. М. Носидом, дает возможность вычислить абсолютную грузоподъемность сухогрузного судна с СУ в средней части в функции главных размерений, длины $L_{\text{св}}$, занимаемой СУ, и некоторых коэффициентов, характерных для проектируемого судна.

По уравнению (5.27) и преобразованием виде можно найти удельную грузоподъемность судна $\mu_s = W_T / P_s$.

Так как $P_s = \eta_s D$; $\mu_s = W_T / \eta_s D$. Тогда

$$\mu_s = \frac{W_T}{\eta_s \eta_p \delta_{\text{св}} L B T} \quad (5.28)$$

Из выражений (5.27) и (5.28) вытекает

$$\mu_s = \frac{1}{\eta_s \eta_p} \frac{\delta_{\text{св}} k_{\text{св}} - \delta_M (L_M/L)}{\delta} \left(\frac{H}{T} - \frac{H_{\text{св}}}{T} \right) \quad (5.29)$$

Это уравнение удельной грузоподъемности для сухогрузных судов с СУ в средней части по длине судна также получено Л. М. Носидом [61].

* $\delta_{\text{св}}$ — относительный объем грузовых трюмов и МО в объеме стандартному объему судна. Этот коэффициент увеличивается в результате учета конингсов люков, палубы и шлюз-тердеков.

Рассматривая уравнения (5.27) и (5.29), можно сделать вывод: 1. Грузоподъемность растет пропорционально B , но ширина судна не оказывает влияния на удельную грузоподъемность.

2. Длина судна L , от которой в значительной степени зависит абсолютная величина грузоподъемности, на удельную грузоподъемность влияет в малой степени.

3. На первый взгляд, увеличение коэффициента обшей полноты δ , входящего в знаменатель в (5.29), должно увеличивать удельную грузоподъемность, однако вследствие связи $\delta_{\text{св}}$ с δ этот вывод нужно проверить.

Преобразуем второй сомножитель в выражении (5.29). Учитывая, что по статистике $\delta_{\text{св}} \approx \delta + 0,1$, и $\delta_{\text{св}} \approx 1$, получаем

$$\frac{\delta_{\text{св}} k_{\text{св}} - \delta_M (L_M/L)}{\delta} \approx \frac{(\delta + 0,1) k_{\text{св}} - (L_M/L)}{\delta} = k_{\text{св}} - \frac{(L_M/L) - 0,1 k_{\text{св}}}{\delta} \quad (5.30)$$

Второй член (5.30), содержащий коэффициент δ , мал по сравнению с $k_{\text{св}}$. Влияние δ на μ_s , оставаясь малым, может быть положительным или отрицательным в зависимости от абсолютных величин L_M/L и $k_{\text{св}}$. По данным А. В. Бронникова, для грузовых судов [26] L_M/L не бывает менее 0,12, а $k_{\text{св}}$ всегда меньше 1. Таким образом, все выражение (5.30) с увеличением δ растет, что приводит к увеличению удельной грузоподъемности, хотя и незначительному.

4. Увеличение высоты борта и отношения $k_T = HT$ в формулах (5.27) и (5.29) вызывает почти прямо пропорциональный рост абсолютной и удельной грузоподъемности. Это позволяет значаще k_T , рассматривая вопрос о μ_s . Особое влияние величина k_T на вместимость, которое уже отмечалось в 5.2, ясно обнаруживается и из формулы (5.29).

5. С увеличением коэффициента η_s уменьшается μ_s , поскольку, чем больше значение η_s , тем меньше при данной грузоподъемности возмещается D , а следовательно, и внутренний объем судна.

Следует отметить, что в случае использования судна на коротких рейсах, т. е. с малым запасом топлива, при сохранении указанной в задании удельной грузоподъемности, может возникнуть необходимость принимать за предельную грузоподъемность действующего судна. В этом случае уравнение (5.29) будет иметь вид

$$\mu_s = \frac{1}{\eta_s \eta_p \delta_{\text{св}}} \frac{\delta_{\text{св}} k_{\text{св}} - \delta_M (L_M/L)}{\delta} \left(\frac{H}{T} - \frac{H_{\text{св}}}{T} \right) \quad (5.31)$$

5.5. Удельная грузоподъемность, удельный погруженный объем. Связь удельной грузоподъемности с δ_T

Удельным погруженным объемом μ_p (удельной погруженной кубатурой) называется отношение объема, занимаемого грузом, к массе этого груза; величина μ_p (измеряемая объемом в куб. метрах

Таблица 5.1

УДЕЛЬНЫЙ ПОСУЗУЧНЫЙ ОБЪЕМ (КУБАТУРА) ГЕНЕРАЛЬНЫХ ГРУЗОВ [74]

Наименование груза	Вид упаковки	$\mu_{уд}$, м ³ /т
Пух	Ткань	11,20
Автомашины	МОБИЛЬ	3,20—10,50
Пухляки	Ткань	3,70—4,30
Обуви (пары)	Ткань, меховая, кожа	1,80—5,20
Пробка прессованная	Картон	3,20
Волокно прессованное	Картон, ткань	3,30—5,58
Табак	Ткань	4,20—5,00
Лист изразцовый	Картон	4,20
Сахар	Папирок	4,20
Кокаин, опии, маки	Ткань, бумага, пластик	2,50—4,20
Кофе	Ткань	3,40—3,50
Какао шоколадный	Бумага	3,60
Масло в тубах	—	2,40—3,20
Виноград	Сидерат, бочка	3,40—3,60
Семя прессованное	Картон	3,40
Пшеница смолотая	»	3,00—3,34
Шелк	»	2,94—3,24
Ванна	Картон	2,80—3,00
Чай	Ящик	3,00
Джут прессованный	Картон	2,25—2,43
Текстильные изделия, мануфактура	»	2,24—2,77
Стекло в ящиках	Ящик	2,35—2,40
Яблоко, лимон, апельсин	»	2,20—2,50
Масло в бочках	»	2,40
Пшеница	Ящик	2,38
Макарон	»	2,10—2,38
Парфюмерия	»	1,84—2,28
Омлет	Миска	2,30
Бекон	Ткань	2,24
Кефир	Миска	1,95—2,00
Картофель	»	1,68—1,88
Овощи замороженные	Пакет	1,84
Золото березовый, сурьма	Бочка	1,84
Кокаин в тубах	Миска	1,76—1,84
Масло растительное	Бочка	1,30—1,61
Бобы, горох	Миска	1,28—1,71
Мука, крупа	»	1,11—1,76
Сахар	Бочка, мешок, картон	1,67—1,75
Кофе	Мешок	1,70
Картон	Картон	1,45—1,67
Стекло	Ящик	1,39—1,67
Туризм жидкое	—	1,30—1,61
Пластика, резина	Мешок	1,40—1,60
Железо	Мешок, катушка	1,50
Волокно	Сверток	1,25—1,53
Кокаин, фрукты, рыба и др.	Ящик	1,25—1,75
Цветок	Насылок	1,25—1,75
Соль	Мешок	1,02—1,11
Железо гофрированное	Сверток	0,99
Кабель электрический	На барабане	0,85

Продолжение табл. 5.1

Наименование груза	Вид упаковки	$\mu_{уд}$, м ³ /т
Газога	Бочка	0,71—0,85
Металлолом	—	0,57—0,85
Медь, олово и сплавы в слитках	—	0,35—0,34
Рельсы стальные	—	0,28—0,34

на тонну) зависит от физической плотности материала груза, его упаковки и от особенностей укладки его в грузовых помещениях (табл. 5.1) [74].

Естественно, что удельная грузоподъемность $\mu_{уд}$ может не совпадать с $\mu_{суд}$. Рассмотрим возможные случаи:

1) $\mu_{суд} = \mu_{уд}$ — судно с полной грузом погружено по заданную осадку, его грузоподъемность используется полностью;

2) $\mu_{суд} < \mu_{уд}$ — судно сидит по заданную осадку, однако его грузоподъемность используется неполностью;

3) $\mu_{суд} > \mu_{уд}$, а груз невозможно принять на палубу; грузоподъемность судна (из-за недостатка вместимости) и допускаемая осадка не используются.

Таким образом, первый и второй случаи более благоприятны, чем третий.

Однако неполное использование вместимости во втором случае тоже нельзя считать положительным фактором, так как оно обусловлено завышенными размерами n , а частности, чрезмерно высоким бортом. Это влияет на увеличение валовой и чистой вместимости и вынуждает с судна сборов.

В любом случае следует стремиться укомплектовать груз так, чтобы средний посузучный объем груза был возможно ближе к удельной грузоподъемности судна.

При назначении $\mu_{уд}$ для судна, проектируемого для определенной линии, следует изучить грузопотоки на этой линии с точки зрения колебания значений $\mu_{уд}$. Эти колебания могут быть зафиксированы в виде гистограммы и соответствующей ей вероятностной кривой (рис. 5.8). Если будет принята средняя величина $\mu_{уд}$, то в значительном числе случаев судно будет эксплуатироваться в недеружном состоянии.

Таким образом, необходимо решить вопрос, какие значения $\mu_{уд}$ следует исключить и заданно на проектирование. Принимая $\mu_{уд} = \mu_{суд} + \Delta\mu_{уд}$ и увеличивая $\Delta\mu_{уд}$, мы будем повышать вероятность полной загрузки судна. Однако, пытаясь обеспечить практически полную загрузку, можно при этом значительно завысить $\mu_{уд}$, а следовательно, и размеры судна. Во всяком случае тенденция к увеличению $\mu_{уд}$ привнесла на архитектурно-конструктивном типе судна: в целях увеличения удельной грузоподъемности стрелась судна шельдердичные и шельдердичные открыто-закрытого типа с

двух маршами осадки (верхней — грузовой и нижней — тоннажной). Они эксплуатируются при двух значениях μ_r .

Для того чтобы решить, какое отношение $k_T = H/T$ должно соответствовать заданной удельной грузоемкости, следует обратиться к уравнению (5.29). Преобразуя его, получаем

$$k_T = \frac{H}{T} = \mu_r \eta_r \Phi_r \frac{b}{\delta_{\text{вн}} \delta_{\text{вн}} - \delta_{\text{вн}} (L_{\text{вн}}/L)} + \frac{H_{\text{вн}}}{T} \quad (5.32)$$

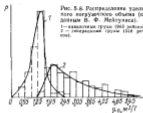


Рис. 5.6. Распределение удельного погрузочного объема (по данным В. Ф. Мельникова).
1 — ледовый груз (0,6 балла);
2 — тоннажный груз (1,0 балла).

Подставляя в выражение (5.32) данные, получаемые в результате решения уравнения нагрузки, значения δ , $L_{\text{вн}}/L$, а также $\delta_{\text{вн}}$, $k_{\text{вн}}$ и $H_{\text{вн}}/T$, вычисленные по статистическим формулам, можно найти k_T . Чтобы оценить порядок величины k_T , соответствующих разным значениям μ_r и η_r , упростим выражение (5.32).



Рис. 5.9. Кривые зависимости η_r , Φ_r и k_T по формуле (5.32).

По статистическим формулам, можно найти k_T . Чтобы оценить порядок величины k_T , соответствующих разным значениям μ_r и η_r , упростим выражение (5.32).

Принимая $k_{\text{вн}} \approx 1,03$; $\frac{\delta}{\delta_{\text{вн}} \delta_{\text{вн}} - \delta_{\text{вн}} (L_{\text{вн}}/L)} \approx 1,04$ [см (5.30)]; $H_{\text{вн}}/T \approx 0,16$ (по Л. М. Ногуду и Н. Е. Путову), получим

$$k_T = 1,07 \mu_r \eta_r + 0,16 \quad (5.33)$$

Это выражение позволяет определить порядок k_T в грубом приближении. При этом значения k_T обеспечиваются заданная грузоемкость судна.

Из кривых на рис. 5.9 видно, что при тяжелом грузе ($\mu_r < 1$) вместимость судна с минимальным надводным бортом при определенном из уравнения нагрузки водоизмещения будет обеспечена, поскольку она обеспечивается для реальных значений μ_r и η_r уже при нулевом надводном борте ($k_T = 1,0$). Составлять в этом случае уравнение вместимости (5.29) или (5.31) не следует.

При рассмотрении вопроса о полной или удельной грузоемкости при штучном грузе нужно делать вычеты на набор, так как при штучном грузе пространства между набором и грузом могут оказаться незаполненными. Для этого либо исправляют удельный погрузочный объем, либо уменьшают удельную грузоемкость для штучного груза по сравнению с таковой для насыпного (валового) груза.

Выражения (5.27) и (5.29) относились к насыпному грузу; запишем их теперь для штучного груза:

$$W_{\text{г.ш}} = k_{\text{ш}} [\delta_{\text{вн}} k_{\text{вн}} - \delta_{\text{вн}} (L_{\text{вн}}/L)] L B (H - H_{\text{вн}}); \quad (5.34)$$

$$\mu_r = \frac{k_{\text{ш}}}{\eta_r \Phi_r} \frac{\delta_{\text{вн}} k_{\text{вн}} - \delta_{\text{вн}} (L_{\text{вн}}/L)}{\delta} \left(\frac{H}{T} - \frac{H_{\text{вн}}}{T} \right), \quad (5.35)$$

где $k_{\text{ш}} = W_{\text{г.ш}}/W_{\text{г.н}} = \mu_r \eta_r \Phi_r = 0,90 \pm 0,02$ (индекс ш означает штучный груз). Величина $k_{\text{ш}}$ определяется здесь статистически.

5.6. Уравнения вместимости для судов с двойными бортами и ледового, несущего палубный груз

Уравнение (5.27) в отличие от уравнения (5.16) особенно тесно связано с архитектурно-конструктивным типом судна. Видимым из этого уравнения для судов одного из конкретных конструктивных типов.

Для судов с двойными бортами в формулу (5.27) вместо B надо ввести величину $(B - 2B_0)$, где B_0 — средняя ширина бортового отсека (рис. 5.10):

$$W = [\delta_{\text{вн}} k_{\text{вн}} - \delta_{\text{вн}} (L_{\text{вн}}/L)] L (B - 2B_0) (H - H_{\text{вн}}) \quad (5.36)$$

и

$$\mu_r = \frac{1}{\eta_r \Phi_r} \frac{\delta_{\text{вн}} k_{\text{вн}} - \delta_{\text{вн}} (L_{\text{вн}}/L)}{\delta} \left(1 - 2 \frac{B_0}{B} \right) \left(\frac{H}{T} - \frac{H_{\text{вн}}}{T} \right). \quad (5.37)$$

При составлении уравнений (5.27) и (5.36) предполагалось, что весь груз размещался в трюмах.

Для ледового, несущего часть ледяного груза на палубе, уравнение (5.29) должно быть преобразовано таким образом, чтобы часть грузоподъемности P_r , относящаяся к палубному грузу P_r , рассматривалась отдельно. В этом случае для грузоемкости, обеспечиваемой трюмами объемом $W_{\text{тр}}$, $\mu_r = W_{\text{тр}}/(P_r - P_r)$.

Обычно величина P_d принимается в долях P_r . Более точно P_d может быть подсчитана через объем палубного груза $nLBN_d$ и его удельный возгуживающий объем μ_{gr} : $P_d = (nLBN_d)/\mu_{gr}$, где n — коэффициент, учитывающий долю произведений длины и ширины судна, занятую лесным грузом; H_d — высота штабеля леса, размещенного на палубе.



Рис. 5.10. Схема поперечного сечения судна с двойным бортом.

В результате

$$\mu = \frac{W_{gr}}{P_r - \frac{n}{\mu_{gr}} LBN_d} = \frac{\delta_r k_{gr} - \delta_d (L_d/L)}{\eta_{gr} \delta - \frac{n}{\mu_{gr}} \frac{H_d}{T}} \left(\frac{H}{T} - \frac{H_{p,d}}{T} \right). \quad (5.35)$$

Из (5.36) можно сделать выводы, аналогичные выводам из (5.28).

5.7. Вместимость сухогрузных судов с кормовым и промежуточным расположением машинного отделения. Удифферентовка. Об изменении вместимости при малых приращениях главных размеров

Уравнения (5.29), (5.35), (5.37) позволяют обеспечить вместимость сухогрузного судна и выразить искомую величину $k_T = H/T$ в том случае, когда МО расположено в середине длины и удифферентовка судна с полным грузом на ровный киль трудностей не представляет.

Если МО имеет кормовое или промежуточное (между кормовым и средним) расположение, то при планировании вместимости необходимо учитывать возможность удифферентовки судна с полным грузом. Более сложным в этом случае является вопрос об определении L_d и B_d . Правда, можно предположить, что число кубоватов W_d помещения МО, относимое к одному кубовату расчетной мощности N , которое можно назвать удельным объемом МО: $\mu_{MO} = W_d/N$, остается постоянным независимо от расположения МО по длине судна. Тогда выражение (5.26) можно использовать при

других вариантах размещения МО:

$$W_d = \delta_{dL} B H_{MO} \approx \delta_{dL} L_{MO} B H_{MO} \approx \delta_{dL} L_{MO} B H_{MO}, \quad (5.39)$$

откуда

$$\delta_{dL} \approx \delta_{dL} L_{MO} \approx \delta_{dL} L_{MO}. \quad (5.40)$$

В этих формулах индекс MO означает промежуточное расположение МО, а индекс MO — кормовое.

Как следует из выражения (5.40), вместимость судна с промежуточным и кормовым расположением ЭУ можно определить по уравнению (5.29) с учетом, конечно, его приближенного характера (ЭУ при этом условно размещается в средней части судна).

Однако условия удифферентовки могут внести в расчеты погрешность известности сухогрузных судов с кормовым и промежуточным расположением МО известные поправки.

Вместимость сухогрузных судов с кормовым расположением МО может быть рассмотрена на основании приведенной, разработанных для валлиных судов (см. 5.8 и 5.9).

Полезная грузоподъемность сухогрузного судна с кормовым расположением МО в случае перевозки насыпного груза

$$W_T = k_r \delta_{dL} L_d B (H - H_{p,d}), \quad (5.41)$$

где k_r — коэффициент заполнения трюмов; δ_{dL} — коэффициент полезности теоретического объема грузовых помещений; L_d — длина грузовых помещений.

Учитывая, что

$$\mu = \frac{W_T}{P_r} = \frac{W_T}{\eta_{gr} D} = \frac{W_T}{\eta_{gr} \delta L T},$$

получаем

$$\mu = \frac{k_r}{\eta_{gr}} \frac{\delta_{dL}}{\delta} \frac{\delta_{dL}}{L} \frac{H - H_{p,d}}{T}, \quad (5.42)$$

где $\eta_{gr} = L_d/L$ — коэффициент использования длины судна.

Считая, что судно с полным грузом, т. е. при полном водоизмещении D , сидит на ровном киле, по минимальную осадку, получаем уравнение равновесия

$$D_{gr} = D_{gr} x_{gr} + P_r x_r + P_d x_d, \quad (5.43)$$

где D_{gr} — суммарная масса всех грузов, кроме перевозимого груза и топлива, т. е. величина, несколько превышающая D_{max} ; x_r — абсцисса ЦТВ, выбранная по соотношению ходкости (см. 9.11); x_{gr} — центр тяжести D_{gr} ; x_r , x_d — абсциссы ЦТ груза и толщина (т. е. абсциссы отсчитываются от середины длины судна, т. е. от 10-го теоретического шпангоута).

Разделив почленно обе части выражения (5.43) на DL :

$$\frac{x_r}{L} = \left(1 - \eta_{gr} - \frac{P_r}{D}\right) \frac{x_{gr}}{L} + \eta_{gr} \frac{x_r}{L} + \frac{P_r}{D} \frac{x_d}{L}.$$

Принимаем ЦТ груза лежачим на половине длины l_r (рис. 5.11). Тогда, обозначив через L_m длину МО с asteriskom, запишем $x_r = L_m + L_r/2 - L/2$.

Таким образом,

$$\frac{x_r}{L} = (1-\eta) \frac{x_{0r}}{L} + \eta \left(\frac{L_m}{L} - \frac{1-\eta_{\text{MO}}}{2} \right) + \frac{P_r}{D} \frac{x_r - x_{0r}}{L} \quad (5.44)$$

Из формулы (5.44) следует, что

$$\eta_{\text{MO}} = 1 - 2 \frac{L_m}{L} + \frac{2}{\eta} \left[\frac{x_0}{L} - (1-\eta) \frac{x_{0r}}{L} - \frac{P_r}{D} \frac{x_r - x_{0r}}{L} \right] \quad (5.45)$$

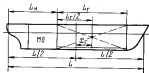


Рис. 5.11. Схема сухогрузного судна с нормальным расположением заднего отделения.

Теперь можно найти из формулы (5.42) отношение $A_T = H/T$, удовлетворяющее заданной удельной вместимости и условиям посадки судна на ровный киль при полном водонеплощении:

$$A_T = \frac{H}{T} = \eta \frac{\delta_{\text{MO}}}{\delta_r} \frac{\delta}{\delta_{\text{MO}}} \frac{\eta_r}{\eta_{\text{MO}}} + \frac{H_{\text{MO}}}{T} \quad (5.46)$$

Подставляя в это выражение величины, уже использованные выше при определении A_T для судов со средним расположением МО, и принимая $\delta_r = 0,9\delta$; $\delta_{\text{MO}} = 1,15\delta$, получаем для насыпного груза $A_T = 0,93 \mu_r (\eta_r/\eta_{\text{MO}}) + 0,16$.

Для спущенного груза, учитывая формулу (5.38), $\delta_r = 1,03 \mu_r (\eta_r/\eta_{\text{MO}}) + 0,16$.

При рассмотрении вопроса о вместимости сухогрузных судов с нормальным расположением МО предполагалось, что весь груз распределяется равномерно. В действительности вьюсовые трюмы вмещают меньше груза на единицу длины судна, чем средние, что несколько изменяет условия удифферентки.

Наконец, поскольку для ряда судов принимаемые грузы могут иметь разные значения μ_r , при закладке можно соответственно распределять эти грузы. Положительную роль в удифферентке судна с МО в море может сыграть устройство грузового танка в ютовой надстройке.

Для промежуточного расположения МО уравнение моментов масс относительно 10-го теоретического шпангоута в продольном направлении будет (рис. 5.12).

$$Dx_0 = (D_{\text{MO}} - P_M)x_{00} + P_M x_{0M} + P_r x_r + nP_r x_{0r} + (1 - n)P_r x_{0r} \quad (5.47)$$

где x_{00} — исправленная абсцисса ЦТ порожнего судна (в его нагрузку не учитывается масса P_M); x_{0M} , x_{0r} , x_{0r} — абсциссы ЦТ МО и груза, расположенного в юсовой и нормальной частях судна; nP_r — масса груза, расположенного в нос от МО.

Принимая длины вьюсовых и кормовых грузовых помещений пропорциональными массе груза, находящегося в них, можно записать $L_{\text{MO}} \approx nL$; $L_{\text{MO}} \approx (1-n)L$.

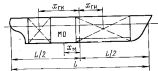


Рис. 5.12. Схема сухогрузного судна с промежуточным расположением заднего отделения.

Тогда, считая для простоты, что ЦТ грузов лежат по середине длины соответствующего отсека, получаем

$$x_{0r} = x_{0M} + \frac{L_M}{2} + \frac{nL_r}{2}$$

$$x_{0M} - x_{0r} = \frac{L_M}{2} - \frac{(1-n)L_r}{2}$$

В результате

$$nP_r x_{0r} - P_r n \left(x_{0M} + \frac{L_M}{2} + \frac{nL_r}{2} \right)$$

и

$$(1-n)P_r x_{0r} - P_r (1-n) \left[\left(x_{0M} - \frac{L_M}{2} - \frac{(1-n)L_r}{2} \right) \right]$$

Отсюда с учетом выражения (5.47) после преобразований получаем

$$\frac{x_r}{L} = (1-\eta) \frac{x_{0r}}{L} + \frac{P_M}{D} \frac{x_{0M} - x_{0r}}{L} + \frac{P_r}{D} \frac{x_r - x_{0r}}{L} + \eta \left(\frac{x_0}{L} + \frac{2n-1}{2} \frac{L_M + L_r}{L} \right)$$

Обозначим $\eta_{\text{вк}} = L_0/L$, найдем

$$\eta_{\text{вк}} = \frac{1}{\eta_r} \frac{1}{\alpha - 0.5} \left[\frac{x_{\text{вк}}}{L} - (1 - \eta_r) \frac{x_{\text{вк}}}{L} - \frac{P_r}{D} \frac{x_{\text{вк}} + x_{\text{вк}}}{L} - \frac{P_r}{D} \frac{x_{\text{вк}} - x_{\text{вк}}}{L} - \eta_r \frac{x_{\text{вк}}}{L} \right] \frac{L_0}{L} \quad (5.48)$$

Определим, исходя из соображений жесткости, $x_{\text{вк}}/L$ и $l = L/\sqrt{V}$, исходя из уравнения нагрузки отобразим P_r/D , P_r/D и η_r , а в соответствии с мощностью и типом ЭВ и желательным расположением МО отобразим $x_{\text{вк}}/L$ и L_0/L . Тогда, зная по формуле с учетом изменения архитектурно-конструктивного типа отношение $x_{\text{вк}}/L$, можно найти $\eta_{\text{вк}}$ по формуле $L_0 = \eta_{\text{вк}} L$. После этого можно по уравнению (5.46) вычислить необходимую для обеспечения вместимости величину $\delta_{\text{вк}}$.

В ряде случаев появляется необходимость внести небольшие поправки в результаты вычислений по приведенным выше формулам. Эти поправки могут быть внесены с помощью метода дифференциалов. Для примера проведем его применение к выражению вместимости судногрузного отсека с МО, расположенным в корме. Будем рассматривать в качестве переменных величин те из них, результаты изменения которых нас интересуют.

Запишем выражение (5.41) в виде $W_T = k \delta_{\text{вк}} \eta_{\text{вк}} L B (H - H_{\text{вк}})$. Считая k , $\delta_{\text{вк}}$ постоянными, получаем

$$\Delta W_T \approx dW_T = \frac{\partial W_T}{\partial \eta_{\text{вк}}} d\eta_{\text{вк}} + \frac{\partial W_T}{\partial L} dL + \frac{\partial W_T}{\partial B} dB + \frac{\partial W_T}{\partial (H - H_{\text{вк}})} d(H - H_{\text{вк}}) \approx W_T \left[\frac{\Delta \eta_{\text{вк}}}{\eta_{\text{вк}}} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta (H - H_{\text{вк}})}{(H - H_{\text{вк}})} \right] \quad (5.49)$$

Из (5.49) очевидно, величина $\eta_{\text{вк}}$, L , $(H - H_{\text{вк}})$ на W_T . Таким образом, уменьшение коэффициента $\eta_{\text{вк}}$ (например, из-за условий удифферентовки) можно компенсировать увеличением L , B либо $H - H_{\text{вк}}$.

5.8. Вместимость наливных судов

В 1927—1930 гг. Е. С. Толкацкий исследовал вопрос вместимости наливных судов с учетом их удифферентовки и предложил уравнение вместимости [88]. Л. М. Ногин после дополнительных исследований в данной области внес некоторые изменения в изображение этого вопроса [62].

Здесь составление и решение уравнения вместимости производится с учетом изменений, которые претерпело тапшеростроение за последние годы.

Современные тапшеры более или менее значительных размеров имеют в своей танковой части не только грузовые, но также балластные и так называемые остойные отсеки. В некоторых случаях в танковой части в целях предупреждения аварии на акваториях устраиваются двойные дни.

Объем танковой части по соображениям, связанным с нагрузкой, будет

$$W_T = W_T + W_{\text{вк}} + W_{\text{о}} \quad (5.50)$$

Здесь $W_T = P_T/\rho_T = (\eta_r/\rho_r) D$; $W_{\text{вк}} = (\eta_{\text{вк}}/\rho_{\text{вк}}) D$; $W_{\text{о}} = c W_T = c (\eta_r/\rho_r) D$, где ρ_r — плотность жидкого груза; $\rho_{\text{вк}}$ — плотность жидкого балласта; $\eta_{\text{вк}}$ — коэффициент балластеровки; c — доля вместимости остойных отсеков от шпангоута грузовых.

Таким образом,

$$W_T = \left[\frac{\eta_r}{\rho_r} (1 + c) + \frac{\eta_{\text{вк}}}{\rho_{\text{вк}}} \right] \eta_r \Delta L B T \quad (5.51)$$

Однако теоретической объем грузовых танков, определяемый по геометрическим характеристикам,

$$W_T = \delta_{\text{вк}} (1 - \nu) L B H, \quad (5.52)$$

где $\delta_{\text{вк}}$ — коэффициент полноты танковой части; ν — относительные вырезы на набор (1—2%) и вольеры жидкостей (3—4%) — всего около 0,03; L — длина танковой части.

Из (5.50) и (5.51) получаем

$$\delta_{\text{вк}} = \frac{H}{T} - \frac{k}{1 - \nu} \frac{P_r}{\rho_r} \left[\frac{\eta_r}{\rho_r} (1 + c) + \frac{\eta_{\text{вк}}}{\rho_{\text{вк}}} \right] \frac{\delta_{\text{вк}}}{\delta_{\text{вк}}} \quad (5.53)^*$$

где $\eta_{\text{вк}} = L_0/L$.

Для малых танкеров, у которых нет чисто балластных и остойных отсеков ($c = 0$; $\eta_{\text{вк}} = 0$),

$$\delta_{\text{вк}} = \frac{k}{1 - \nu} \frac{P_r}{\rho_r} \frac{\delta}{\delta_{\text{вк}}} \frac{\eta_r}{\eta_{\text{вк}}} \quad (5.54)$$

Рассматривая (5.53) и (5.54), можно установить, что увеличение $\eta_{\text{вк}}$ и ρ_r способствует уменьшению $\delta_{\text{вк}}$, и наоборот, что следует учитывать при решении вопроса об удифферентовке судна с полным грузом на рейтовой яхте.

При дальнейшем проектировании следует использовать значение, содержащее P_T , уравнение нагрузки, позволяющее найти D и, следовательно, η_r , затем l (см. гл. 9 и рис. 9.7), а значит, и L , выбираемые также по условиям ходкости. Это позволит сделать набросок продольного разреза, что облегчается при наличии входящего протокола, который может быть исполнением определенных L и L_0 . Последняя величина должна быть проверена относительно расположения размещенной ЭВ.

Удифферентовка наливного судна с отсеками и танковым пространством трех категорий зависит от расположения отсеков. Рациональным расположением балластных танков можно не только добиться ликвидации пустого отсека в носовой части судна, но и существенно уменьшить избыточный момент.

* Следует учесть, что в соответствии с требованиями удифферентовки и при наличии картера систем в двойное дни приходится иногда считать значение k_r заданным по (5.53) как переменное.

При обеспечении вместимости современных танкеров кроме сообразной дифферентовки следует учитывать:

- возможность одновременной перевозки груза, имеющего разную плотность;
- целесообразность разделения танков на грузовые и балластные (такое разделение диктуется главным образом стремлением не загрязнять балластную воду остатками нефтепродуктов);
- возможность уменьшения нагибающего момента, действующего на корпус (преследуя эту цель, ранее шассное отделение (НО) размещали в средней части танкера, однако по эксплуатационным соображениям в последнее время отсек с грузовыми носовыми отсеками располагается непосредственно перед ЗУ).

Размерность груза может быть учтена при определении необходимой вместимости танка путем подсчета среднего значения расчетной плотности:

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{P_T}{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{P_i}{\rho_i}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{\rho_i} \frac{P_i}{P_T}} \quad (5.55)$$

где $P_i = P_1, P_2, \dots$ — массы отдельных видов груза с соответствующей плотностью ρ_i ; P_i/P_T — относительная доля каждого вида груза в общей вместимости:

$$\sum_{i=1}^{n-1} \frac{P_i}{P_T} = 1.$$

Необходимое отклонение x_i/L можно найти из преобразованной формулы (5.43):

$$\frac{x_i}{L} = \frac{Dx_i}{P_i L} = \frac{Dx_i P_T}{P_i L} = \frac{1}{\rho_i} \frac{x_i}{L} \frac{1 - \eta_0}{\eta_0} = \frac{1}{\rho_i} \frac{P_T}{D} \frac{x_i}{L} \quad (5.56)$$

Затем следует найти такое положение грузовых отсеков в пределах танкового пространства, чтобы ЦГ их объема имел абсциссу x_i .

5.9. Определение вместимости и расположения балластных цистерн. Удифферентовка грузовых судов в балластном переходе

Характерным отличием грузовых судов, особенно наливных, от судов других назначений является то, что в процессе эксплуатации их водоизмещение сильно меняется (до 50—80% $D_{\text{полн}}$).

Условие плавания судна во время балластного перехода, особенно на шхоловатом море, зависит от осадки носом T_n и кормой T_k , т. е. от посадки судна. В связи с этим ставится вопрос о принятии такой вместимости и такого расположения балластных

цистерн, при которых осадки носом и кормой должны иметь определенные значения в балластном переходе.

Осадки носом и кормой и средняя осадка при балластном переходе задаются в функции средней осадки судна с полным грузом T , т. е. $T_n = t_n T$ и $T_k = t_k T$.

Коэффициент t_n выбирают таким, чтобы предотвратить смятие. Считается, что

$$t_n > a \frac{L}{T} = a \frac{L}{\delta} \frac{\delta}{T} = a f_p \delta_T,$$

где $a = 0,028 \pm 0,003$.

Осадка кормой $T_k = t_k T$ определяется погружением винта.

Сравнительно недавно, когда максимальные размеры судов, и в частности танкеров, были невелики, диаметры винтов у них были близки к величине осадки судна с полным грузом. Иногда допускалось оголение винта при балластном переходе и в соответствии с этим $t_k \approx 0,7$. Заметим, что при погружении винта, соответствующего $t_k = 1$, вместимость балластных цистерн должна быть значительной.

Увеличение размеров грузовых судов, особенно танкеров, привело к тому, что максимальные осадки этих судов значительно превысили диаметр гребных винтов, ограниченный технологическими условиями, что позволяет принимать для таких судов $t_k < 1$ даже при полном погружении гребного винта.

Средняя осадка судна после разгрузки и балластования

$$T_{\text{ср}} = \frac{T_n + T_k}{2} = \frac{t_n + t_k}{2} T, \quad (5.57)$$

а изменение средней осадки в сравнении с осадкой судна с полным грузом

$$\Delta T = T_{\text{ср}} - T = \left(\frac{t_n + t_k}{2} - 1 \right) T = - \left(1 - \frac{t_n + t_k}{2} \right) T. \quad (5.58)$$

В то же время изменение средней осадки ΔT судна в результате частичной замены груза P_i балластом $P_{\text{бл}}$ может быть представлено так:

$$\Delta T = \frac{P_{\text{бл}} - P_i}{\rho_{\text{бл}} S_{\text{вн}}} = \frac{(\eta_{\text{бл}} - \eta_0) D}{\rho_{\text{бл}} \alpha L \delta} = \frac{(\eta_{\text{бл}} - \eta_0) \delta}{\alpha} \frac{\rho_{\text{вн}} L \delta}{\rho_{\text{бл}} L D} T = - (\eta_0 - \eta_{\text{бл}}) \frac{\delta}{\alpha} T, \quad (5.59)$$

где k — коэффициент выступающих частей; $S_{\text{вн}}$ — площадь гребной ватерлинии.

Приравняв правые части равенств (5.58) и (5.59), получим

$$1 - \frac{t_n + t_k}{2} = (\eta_0 - \eta_{\text{бл}}) \frac{\delta}{\alpha}.$$

$$\eta_{\text{св}} = \eta - \frac{\alpha}{\delta} \left(1 - \frac{t_1 + t_2}{2}\right). \quad (5.60)^*$$

Таким образом, количество балласта, характеризующее коэффициентом $\eta_{\text{св}}$, увеличивается с ростом коэффициента η , коэффициентов t_1 и t_2 и уменьшается с увеличением коэффициента вертикальной полноты судна $\alpha = \delta/\alpha$.

Если взять в качестве примера танкер с $\eta = 0,8$, $\alpha = 0,88$, $\delta = 0,78$; $t_1 = 6,6$; $\delta_T = 2,6$, то при $t_2 = 0,63$, $t_3 \cdot \delta_T = 0,52$ и $t_4 = 1$ по формуле (5.60) имеем $\eta_{\text{св}} = 0,8 - 0,27 = 0,53$, а при $t_4 = 0,52$; $t_4 = 0,70$ — $\eta_{\text{св}} = 0,8 - 0,44 = 0,36$.

Если учесть, что кроме груза в балластном пробеге могут отсутствовать и другие части декейта ДВ, то формула (5.60) в предельном случае может обратиться в выражение

$$\eta_{\text{св}} = \eta_{\text{ДВ}} - \frac{\alpha}{\delta} \left(1 - \frac{t_1 + t_2}{2}\right). \quad (5.61)$$

А. В. Вукшич, учитывая, что не весь декейт будет израсходован к моменту начала балластной, а лишь часть его, предложил формулу [32]:

$$\eta_{\text{св}} = a\eta_{\text{ДВ}} + (1-a)\eta - \frac{\alpha}{\delta} \left(1 - \frac{t_1 + t_2}{2}\right), \quad (5.62)$$

где $a = 0,9$.

При размещении балластных цистерн следует учитывать расположение их обода ЦТ по длине судна $x_{\text{об}}$, обеспечивающего нулевую посылку при балластном переходе.

Положение $x_{\text{об}}$ рассчитывают, исходя из рассмотренных коэффициентов t_1 и t_2 и дифференциального момента, возникающего при частичной замене груза балластом.

Угол дифферента

$$\varphi = \frac{T_{\text{св}} - T_{\text{г}}}{L} = (t_2 - t_1) \frac{T}{L} \quad (5.63)$$

или

$$\varphi = \frac{-M_T + M_{\text{св}}}{DH_{\text{св}}}. \quad (5.64)$$

где $M_{\text{св}}$ — продольная метacentрическая высота.

Приравняв правые части (5.63) и (5.64), получаем

$$(t_2 - t_1) \frac{T}{L} = \frac{-M_T + M_{\text{св}}}{DH_{\text{св}}}. \quad (5.65)$$

* Формула (5.60) является приближенной, поскольку $S_{\text{св}}$ в (5.58) считается постоянной при изменении обода. Чем больше коэффициент полноты судна, тем точнее выражение (5.60).

Следует учесть, что

$$M_T = \eta_{\text{св}} D (x_{\text{св}} - x_{\text{св}}); \quad (5.66)$$

$$M_{\text{св}} = \eta_{\text{св}} D (x_{\text{св}} - x_{\text{св}}). \quad (5.67)$$

где $x_{\text{св}}$ — отстояние ЦТ действующей ватерлинии от 10-го теоретического шпангоута.

Продольную метacentрическую высоту можно приближенно заменить продольным метacentрическим радиусом, определяемым по формуле (5.40),

$$H_{\text{св}} \approx R_{\text{св}} \alpha_{\text{св}} \frac{a^2}{\delta} \frac{L^3}{12T}. \quad (5.68)$$

С учетом формул (5.65), (5.66), (5.67) и (5.68) запишем

$$(t_2 - t_1) \frac{T}{H} = \frac{-\eta_{\text{св}} D (x_{\text{св}} - x_{\text{св}}) + \eta_{\text{св}} D (x_{\text{св}} - x_{\text{св}})}{D \alpha_{\text{св}} \frac{a^2}{\delta} \frac{L^3}{12T}}.$$

отсюда

$$\frac{x_{\text{св}} - x_{\text{св}}}{L} = \frac{(t_2 - t_1) \frac{h_T}{12} \frac{a^2}{\delta} + \eta_{\text{св}} \frac{x_{\text{св}} - x_{\text{св}}}{L}}{\eta_{\text{св}}} \quad (5.69)$$

или, принимая во внимание выражение (5.69),

$$\frac{x_{\text{св}} - x_{\text{св}}}{L} = \frac{(t_2 - t_1) \frac{h_T}{12} \frac{a^2}{\delta} + \eta_{\text{св}} \frac{x_{\text{св}} - x_{\text{св}}}{L}}{\eta_{\text{св}} - \frac{\alpha}{\delta} \left(1 - \frac{t_1 + t_2}{2}\right)}. \quad (5.70)$$

Знаменатель формулы (5.69) может быть принят также по формулам (5.61) или (5.62).

По формулам (5.67) и (5.68) находят ЦТ балластных цистерн, зависимость которых определяется по выражению (5.60) или (5.61) или (5.62).

Следует обратить внимание на то, что главные размеры судна, кроме L , не фигурируют в зависимости (5.69) и (5.70).

Относительная величина $x_{\text{св}}/L$ может быть принята для предварительных расчетов по проволочку: $x_{\text{св}}/L_{\text{св}} = x_{\text{св}}/L$.

Для танкера, имеющего свободные объемы и предельно длинные танковой части $L_{\text{св}}$, можно определять объем и положение ЦТ балластных отсеков на том же участке, исходя из выражений для $\eta_{\text{св}}$ и $x_{\text{св}}$. В результате можно установить такую величину h_T , при которой будет обеспечиваться равновесная удельная полнота судна с полным грузом и балластом.

Международная конвенция по предотвращению загрязнения моря с судно 1973 г. МАРПОЛ-73/78 и дополняющие ее правила Регистр СССР (Правила по предотвращению загрязнения с судно, 1980 г.) предъявляют к судам, перевозящим нефтепродукты, ряд

требований, имеющих существенное значение для решения вопросов, рассматриваемых в данном параграфе.

Согласно этой Конвенции, танкеры для перевозки сырой нефти должны иметь 20 000 т и более или танкеры для перевозки нефтепродуктов должны иметь 30 000 т и более должны иметь:

отдельные чисто балластные танки вместимостью, обеспечивающей среднюю осадку танкера при балластном переводе не менее $T_{\text{об}} \geq 0,02 L_{\text{в}} + 2$, при дифференте на корму не более $0,015 L_{\text{в}}$ и полным погружением гребного вала;

не менее двух отстойных танков общей вместимостью, равной 3% вместимости грузовых танков на судне.

Конвенцией ограничивается объем нефтепродуктов $W_{\text{в}}$, вылавливаемых в море при аварии. При условии повреждения танкера, указанных в Конвенции (см. п. 8.7), допустимый объем нефти $W_{\text{в}} = 30 000 \text{ м}^3$ или $W_{\text{в}} = 400^3 D/W$, смотря по тому, что больше (но не более 40 000 м³).

На один бортовой грузовой танк не должен быть больше 0,75 $W_{\text{в}}$, средний танк — более 50 000 м³. Если грузовой бортовой танк расположен между двумя бортовыми балластными, то его вместимость может достигать $W_{\text{в}}$.

Конвенция сертифицирует также размеры танков (подробнее — см. 8.7).

5.10. Вместимость судна, определенная по правилам обмера

Выше рассматривались вопросы определения технической вместимости судна и решались задачи обеспечения объемов, потребных для размещения груза, металлов, жидких аммиаков и т. д. Однако вместимость судна служит основанием для расчетов, зависящих от стоимости фрахтования судна, количества налогов и сборов, оценки продажной стоимости. Так, для прохода через Суэцкий канал дане с военных кораблей взимает плату, зависящую от их вместимости.

Все эти эксплуатационно-финансовые задачи решались по правилам обмера вместимости, история существования которых берет свое начало в XVI в. Эти правила были сложны и содержали большое количество условностей. Имело условность этих правил видела замечание М. Стефена о том, что они «показывают судостроителям и оскарбуют их умы».

Существовало множество так называемых национальных правил, которые действовали уже в наши дни и подпадали нормирующим организациям отдельных государств. В соответствии с этими правилами определялась регистровая вместимость, или регистровая тоннаж, и так называемых регистровых тоннаж: (1 рег. т = 100 фт³, или 2,83 м³).

* В Конвенции рассчитана длина судна $L_{\text{в}} = 0,96 L_{\text{вдв}}$.

Правила определения регистровой вместимости влияли на выбор конструкции и свойств судов. Одним из порождений действовавших правил являлись шельтердеки судна, у которых верхний грузовой танкер прорезывался специальными «выбранными» отверстиями, формально позволяющими исключать верхние объемы как регистровой вместимости. Во время второй мировой войны эти отверстия стали заваривать, чтобы исключить их платёжное влияние на непопозаемость судов, подвергавшихся действию подводных лодок и самолетов.

После войны, стремясь одновременно удовлетворить требования минимальной регистровой вместимости и максимальной полезности, была введена так называемая промежуточная марка, позволяющая исключать вместимость верхнего танкера из общей регистровой вместимости судна, если оно идет по эту марку. Более высокая грузовая марка соответствует возвышенному борту судна, измеренному от кромки шельтердека.

Регистровый тоннаж получил широкое признание и часто рассматривался как основа характеристика размеров судна. Конечно, эта величина связана с техническими характеристиками судна, что дало возможность А. В. Бронникову получить зависимость регистровой вместимости различных судов от дедвейта, кубического модуля (LBN), технической вместимости и числа стандартных контейнеров [28].

В 1982 г. в действие вступили новые правила, принятые Международной конвенцией по обмеру судов 1969 г., при разработке которых пришлось преодолеть разногласия договаривавшихся стран. По правилам конвенции 1969 г., ряд помещений, например шельтердекий танкеры, холлы и каюты закрытых помещений, что уравнивает шельтердекие и полубатареи судна в отношении их обмерной вместимости.

Характерным для новых правил является использование технической вместимости, общей и грузовой, числа пассажиров, а также отношения $k_T = H/T$, роль которого выяснена в предыдущем тексте. Благодаря этому правила стали менее условными, чем прежние.

В качестве единицы измерения вместимости предложены те же регистровые тонны, хотя они в правилах не упоминаются.

Валовая вместимость судна (gross tonnage) определяется по формуле

$$GT = k_1 W, \quad (5.71)$$

где $k_1 = 0,2 + 0,02 \lg_{10} W$; W — общая теоретическая техническая вместимость всех закрытых помещений судна, м³.

Коэффициент k_1 медленно изменяется с ростом W :

$W, \text{ м}^3$	100	1000	10 000	100 000	1 000 000
k_1	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32

Если бы вместимость GT (по существу, брутто регистровый тоннаж), определяемая по правилам Конвенции, равнялась технической вместимости W , то $k_1 = 1/2,83 = 0,357$.

В действительности валовая вместимость составляет при $W = 1\,000\,000 \text{ м}^3 \frac{0,32}{0,367} = 0,9$, а при $W = 100 \text{ м}^3 \frac{0,24}{0,367} = 0,6$ валовой вместимости.

Эти соотношения регистровой и технической вместимости были характерны для судов до 1969 г., т. е. суда больших размеров были более выгодными (расходы, определяемые регистровой (обмерной) вместимостью были меньше).

Чистая вместимость судна (net tonnage) определяется по формуле

$$NT = A_0 W_1 \left(\frac{4}{3A_1} \right)^3 + A_2 \left(A_1 + \frac{A_2}{10} \right), \quad (5.72)$$

где $A_0 = 0,2 + 0,02 \log_{10} W_1$; $A_1 = 1,25 \left(1 + \frac{GT}{10^4} \right)$.

W_1 — общий теоретический объем грузовых помещений, м^3 ; A_1 — NT (T для грузовых судов берется по грузовой марке (не ласуну), а для пассажирских судов по осадке, соответствующей самой высокой ГВЛ деления судна на отсеки); A_2 — число пассажиров в кюветах с числом коек не более восьми; A_3 — число остальных пассажиров.

При расчетах по формуле (5.72) действуют следующие ограничения:

1. При общем количестве пассажиров $(A_1 + A_2) < 13$ считается, что $A_1 = 0$ и $A_2 = 0$.

2. При $\frac{4}{3A_1} \leq 1$, т. е. при $A_1 \leq 1,333$, или относительно малых значениях A_1 , это отношение должно считаться равным не менее 1,333.

$$3. A_2 W_1 \left(\frac{4}{3A_1} \right)^3 \geq 0,2507 T.$$

$$4. NT \geq 0,3 GT.$$

Сначала правила Конвенции применялись лишь к новым судам, но с 1984 г. она обязательна и для судов, построенных до вступления Конвенции 1969 г. в силу, т. е. до середины 1982 г.

6.1. Основы методики получения статистических формул

При рассмотрении вопроса определения водонизменения и вместимости судна иногда широко использовались данные статистики, причем обычно учитывались средние величины. Между тем задачи проектирования судна требуют знания не только среднего значения какой-либо величины, но и пределов, в которых она изменяется.

Очевидно, что предельные величины (измерительные массы, измерители вместимости, коэффициенты формы и т. д.) должны зависеть не от окончательные результаты расчетов. В некоторых случаях рассматривают сумму колеблющихся величин, хотя колебания суммы оказываются меньше, чем колебания каждого слагаемого. Чтобы не оказать неблагоприятного влияния на определенную величину, в сумму вводят дополнительное слагаемое, гарантирующее получение конечного результата, не отклоняющегося от основной величины в неблагоприятную сторону. В уравнении нагрузки (масс), например, таким слагаемым является запас водонизменения. Приходится учитывать и колебания величин, получаемых по формулам с малым числом членов или одноклассных.

Из приближенных формул, основанных в большей мере на статистических данных, можно особо отметить выражения, связывающие коэффициенты полноты между собой, а некоторые элементы теоретического чертежа с этими коэффициентами и размерениями судна.

Ниже излагаются пути получения таких формул. Следует иметь в виду, что аналогично могут быть получены другие величины, например, относительная длина и коэффициент общей полноты судна (см. п. 9.9, 9.10), зависящие от скорости и числа Фруда.

Изучение довольно обширной литературы, в которой отражены результаты статистического обследования современных судов, показало, что зависимости между их характеристиками изображаются волнами сильно разбросанных точек [54, 63]. Получить по таким «точкограммам» (пунктограммам) аналитические выражения, которые могут быть использованы при проектировании новых судов, весьма сложно. На рис. 6.1 для примера показана статистическая зависимость между коэффициентами α и δ (по данным А. Людбланда) для ряда транспортных судов, построенных в 1950 г. [54]. На рис. 6.2 показана зависимость тех же величин для совре-

менных промышленных судов по исследованию Нгуен Куанг-Винг [61].

Рассматривая рис. 6.1, можно легко убедиться в том, что у двух разнотипных судов, имеясь один и тот же коэффициент общей площади δ , коэффициент полезности расчетной ватерлинии α может колебаться от 0,76 до 0,83, т. е. более чем на 10 % средней величины. Значительная часть отклонений этого коэффициента, относящихся к тому же значению δ , будет меньше. Такие же выводы следуют из анализа рис. 6.2. Однако результаты статистического обследования, зафиксированные на рис. 6.1 и 6.2, показывают, что принятые в ряде проектов значения α не только не совпадают с его средним значением, но и сильно отклоняются от него. Для правильного суждения о величинах α , допускаемых практикой при

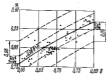


Рис. 6.1. Связь коэффициента полезности α и δ в зависимости от формулы (6.20).



Рис. 6.2. Связь коэффициента полезности α и δ для промышленных судов.

данном значении δ , необходимо обращать внимание не только на среднюю величину α , но и на ее отклонения при заданном δ .

В общем случае зависимость между α и δ может быть рассмотрена как частный случай зависимости y от x . Для получения закон статистической зависимости необходимо определить: среднюю величину \bar{y}_0 при данном x ; меру колеблемости величины y при данном x .

Определением средних величин по данным статистики занимались многие судостроители. Они составили ряд приближенных формул, связывающих различные проектные характеристики судна между собой. Вид таких зависимостей (прямая, гипербола, парабола и т. д.) определяется двумя: 1) замечается на глаз; 2) в основу кладется приближенная аналитическая связь между рассматриваемыми величинами.

В первом случае рассматривается поле точек и намечается вид приближенной зависимости $y_0 = f(x)$ с учетом характера расположения точек на поле. Например, когда y резко возрастает при увеличении x , может показаться пригодной парабола с показателем степени, большим единицы; при умеренном возрастании y — парабола с показателем степени, меньшим единицы. Если среднее

значение y_0 уменьшается с увеличением x , могут применяться зависимости гиперболического типа $y = a/x^n$. Для возрастающих и убывающих функций возможно использование прямых с их аналитическим выражением: $y = ax$, $y = a + bx$, $y = a - bx$ и др. Здесь не перечисляются все возможные варианты, пригодные для получения приближенных кривых.

Одновременно кривую средних величин можно получить, проводя линию (кривую или прямую) на глаз или определяя ее положение путем расчета коэффициентов и показателей степени по методу наименьших квадратов.

Во втором случае устанавливают приближенную аналитическую связь между рассматриваемыми величинами. В аналитическую зависимость вводят коэффициенты (по статистическим данным) для получения средней величины и определяют пределы колебания этих коэффициентов. Таким образом были найдены средние коэффициенты ЦВ над ОЛ в функции π , δ , V (способы Эйлера, Пандорина и Морриси (автор формулы Нормана) и средние метацентрические радиусы (по Эйлеру).

В. Швигт [97] предложил общую формулу, фиксирующую приближенную аналитическую связь между рассматриваемыми величинами:

$$\text{величина} = (\text{коэффициент}) \times (\text{приближенная величина}). \quad (6.1)$$

6.2. Приложение метода наименьших квадратов и построению кривых средних величин

Метод наименьших квадратов позволяет найти среднюю величину $y_0 = f(x)$, если функция замечена удачно. При этом исходят из того, что сумма квадратов разностей между значениями, взятыми из практики, и значениями, полученными по приближенным формулам, должна быть минимальной. На языке теории вероятностей это условие формулируется так: дисперсия истинных величин по отношению к среднему их значению, определенной формулой, должна быть минимальной.

Пусть функция $f(x)$ имеет n постоянных коэффициентов ($a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$). Для нахождения их из условия минимума суммы квадратов разностей $f(x_i)$ от n практических значений y_i нужно, чтобы производная соответствующей суммы квадратов отклонений равнялась нулю:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{da_1} \sum_{i=1}^n (f(x_i) - y_i)^2 &= 0; \\ \dots &\dots \\ \frac{d}{da_n} \sum_{i=1}^n (f(x_i) - y_i)^2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6.2)$$

Например, для определения среднего значения $y_{cp} = f(x)$ по пяти точкам используем уравнение прямой $y = f(x) = a + bx$ и для нахождения двух его коэффициентов запишем

$$\sum_{i=1}^n [(a + bx_i) - y_i]^2 = 0;$$

$$\sum_{i=1}^n [(a + bx_i) - y_i]^2 = 0.$$

Отсюда

$$\sum_{i=1}^n (a + bx_i - y_i) = 0;$$

$$\sum_{i=1}^n (ax_i + bx_i^2 - x_i y_i) = 0,$$

где

$$5a + b(x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5) - (y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5) = 0;$$

$$a(x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5) + b(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 + x_5^2) - (x_1 y_1 + x_2 y_2 + x_3 y_3 + x_4 y_4 + x_5 y_5) = 0.$$

Решение этой системы позволяет найти a и b .

Введение функций с числом коэффициентов, большим двух, усложняет задачу и для целей теории пространств сфер используется как исключение.

В качестве примера обработки данных по методу наименьших квадратов здесь использована линейная функция, но возможно применение к другим функциям.

При решении уравнений могут получиться малые разности больших величин, например при установлении зависимостей между коэффициентами теоретического чертежа. В этом случае следует перенести начало координат в точку, близкую к наименьшим значениям рассматриваемых коэффициентов.

Так, при исследовании связи между коэффициентами α и δ полезно установить зависимость между $\delta' = \delta - 0,5$ и $\alpha' = \alpha - 0,6$, а затем в полученной формуле $\alpha' = f(\delta')$ заменить α' и δ' на α и δ .

При счете на ЭВМ метод наименьших квадратов может быть заменен методом наименьших модулей [60].

6.3. Определение отклонений величин от их средних значений

Наиболее простой формой, учитывающей колебание величины y , будет

$$y = y_{cp} \pm \Delta y. \quad (6.3)$$

Выражение (6.3) может быть записано и так:

$$y = k_{cp} f_1(x) \pm \Delta k f_1(x)$$

или

$$y = (k_{cp} \pm \Delta k) f_1(x). \quad (6.4)$$

В последнем случае рассматривают отклонения коэффициента от его средней величины k_{cp} , что приемлемо, когда основа $f_1(x)$ формулы определяется по универсальной теоретической зависимости.

Найдем Δy в формуле (6.3). Наиболее простым путем будет получение дисперсии

$$\sum_{i=1}^n \overline{U} (x_i - y_i)^2 = \sum_{i=1}^n \overline{U} \delta_i^2.$$

Здесь определяют отклонения в каждой исходной точке (идеаль ординаты) от точки, соответствующей той же абсциссе и лежащей на кривой средних значений $f(x_i)$. Затем вычисляют дисперсию, а до ней — общие характеристики отклонений (среднее, квадратичное, наибольшее); одну из них и принимают за Δy .

Однако интересен и другой путь получения Δy .

Установим максимальное отклонение ϵ_{max} по графику $y = f(x)$. Затем определим исходные точки, лежащие выше кривой средних значений $f(x)$ (соответствующие положительным отклонениям), в n групп, а точки, лежащие ниже кривой средних значений (отрицательные отклонения) — также в n групп. Одна из групп — нулевая — будет располагаться у кривой средних значений так, что верхняя и нижняя ограничивающие ее кривые будут отстоять от кривой средних значений на $\epsilon_{max}/2n$.

Таким образом, в $+1-n$ и $-1-n$ группах будут заключаться отклонения от $|\epsilon_{max}/2n|$ до $|3\epsilon_{max}/2n|$; в $+2-n$ и $-2-n$ — от $|3\epsilon_{max}/2n|$ до $|5\epsilon_{max}/2n|$; в $+j-n$ и $-j-n$ группах — от $|\frac{2j-1}{2n} \epsilon_{max}|$ до $|\frac{2j+1}{2n} \epsilon_{max}|$. Наконец, в $+n$ и $-n$ группах будут заключаться отклонения от $|\frac{2n-1}{2n} \epsilon_{max}|$ до $|\frac{2n+1}{2n} \epsilon_{max}|$.

Точка, соответствующая ϵ_{max} , будет находиться посредине последнего n -го промежутка.

Указанная разбивка позволяет построить так называемую гистограмму (рис. 6.3), т. е. график, состоящий из ряда прямоугольников с основанием ϵ_{max}/n и высотой (плотностью распределения)

$$f_i = \frac{x_i/n}{\epsilon_{max}/n}. \quad (6.5)$$

Отношение каждой средней вертикали столбика до средней оси (среднего значения $\bar{x}_0 = \bar{x}$) равно $f(x_{max})$.

В выражении (6.5) m_j — число точек группы j ; $m = \sum_{j=-k}^{+k} m_j$,

т. е. общее число точек рассматриваемого поля.

Из сказанного видно, что площадь каждого столбика равна m_j/m , а общая площадь гистограммы $\sum_{j=-k}^{+k} (m_j/m) = 1$.



Рис. 6.3. Гистограмма отклонений от среднего значения.



Рис. 6.4. Кривая Гаусса, соответствующая гистограмме рис. 6.3.

Гистограмма дает наглядное представление о распределении отклонений от средней величины. Чем ближе распределение отклонений к так называемому нормальному, а очертания гистограммы к кривой нормального распределения (к кривой Гаусса), тем больше оснований для закона гистограммы кривой Гаусса (рис. 6.4). Напомним, что закон нормального распределения характеризует распределение величин, на которые одномерно влияет ряд факторов, независимых друг от друга.

Кривая Гаусса для интересующего нас случая выражается аналитически так:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_x}} \exp\left(-\frac{x^2}{2D_x}\right), \quad (6.6)$$

где $f(x)$ — плотность распределения; $D_x = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 f(x) dx$ — дисперсия.

Кривая Гаусса в отличие от гистограммы показывает распределение непрерывной величины. Она асимптотически приближается к оси абсцисс (ординаты при абсциссах $x = +\infty$ и $x = -\infty$ равны нулю).

Гистограмму практически можно заменить кривой Гаусса при условии, но достаточно большом числе точек n в рассматриваемом поле, когда отклонения точек x от среднего значения $f(x)$ будут конечны, т. е. в случае так называемого усеченного нормального распределения [44], при котором отклонения заключаются между конечными значениями $\pm k \cdot \sigma_{max}$.

Ординаты кривой распределения при конечном числе точек поля определяются так:

$$f(x_j) = \frac{m_j/m}{k_{max}/n},$$

т. е. будут равны ординатам (высотам столбиков) гистограммы. При этом дисперсия

$$D_x = \sum_{j=-k}^{+k} f(x_j) x_j^2 \frac{k_{max}}{n} = \sum_{j=-k}^{+k} \frac{m_j}{n} x_j^2, \quad (6.7)$$

где

$$\begin{aligned} j=0; & \quad x_0 = 0; \\ j=1; & \quad x_1 = k_{max}/n; \\ j=-1; & \quad x_{-1} = -(k_{max}/n); \\ j=2; & \quad x_2 = 2(k_{max}/n); \\ j=j; & \quad x_j = j(k_{max}/n); \\ j=-j; & \quad x_{-j} = j(k_{max}/n) - k_{max}; \\ j=-n; & \quad x_{-n} = -k_{max}. \end{aligned}$$

Вычисляя по формуле (6.7) дисперсию для гистограммы, можно построить кривую Гаусса с той же дисперсией по формуле (6.6), доведя ее до значений $\pm k_{max}$. Эта кривая будет приближенно изображать распределение отклонений в заданных точках от кривой средней величины в заданном поле этих точек. Дисперсию считают характеристической рассеивания точек в рассматриваемом поле.

Другой характеристикой рассеивания точек являются так называемый стандарт, или среднее квадратичное отклонение: $\sigma = \sqrt{D_x}$, имеющие размерность x .

Граничей рассеивания считают так называемое предельное отклонение, равное трем стандартам:

$$\sigma_{max} = 3\sigma = 3\sqrt{D_x}.$$

При действии нормального закона вероятность превышения этого отклонения равна четверти процента (точнее 0,27 %).

Сказанное дает достаточный материал для получения класса Δx в формуле (6.3).

Нет никаких затруднений и в том, чтобы найти по методу наименьших квадратов k в формуле (6.4), а затем при помощи анализа отклонений Δx .

Решение вопроса, какое значение отклонения ввести в формулы (6.3) и (6.4), зависит от того, желает ли проектиant охватить формулой все поле точек или область наиболее интересных его значений. В первом случае играет роль наибольшее отклонение σ_{\max} , во втором — среднее квадратичное σ .

Однако не всегда целесообразно вычислять приведенными выше способами σ и σ_{\max} . Зачастую можно, имея на поле точек кривую средних значений $y_{cp} = f(x)$, определить абсолютную величину отклонения наиболее отдаленной от этой кривой точки и это расстояние принять за σ_{\max} . При этом все точки будут находиться между пределами $y = y_{cp} + \sigma_{\max}$; $y = y_{cp} - \sigma_{\max}$.

Можно распространить эти рассуждения и на формулу (6.4), в которой определены отклонение и коэффициент δ_{σ} .

6.4. Связь между коэффициентами полноты по Норману. Строевые. Кривые средних ординат

Норман установил, что отклонение $(\alpha\beta)/\delta$ для судов 60-х годов XIX в. имело среднюю величину

$$\left(\frac{\alpha\beta}{\delta}\right)_{cp} \approx 1,15.$$

В ходе исследований большой группы быстроходных судов (85 теоретических чертежей), построенных между 1910 и 1960 гг., была получена практически та же величина:

$$\left(\frac{\alpha\beta}{\delta}\right)_{cp} \approx 1,16. \quad (6.8)$$

Таким образом, более чем за полвека это соотношение почти не изменилось. Не изменилось оно и до наших дней.

Из (6.8) можно получить для средней величины

$$\alpha \approx 1,16(\delta/\beta) - 1,16\varphi \quad (6.9)$$

и для средней величины

$$\beta \approx 1,16(\delta/\alpha) - 1,16\varphi. \quad (6.10)$$

Если учесть колеблемость величины (6.8), то получим

$$(\alpha\beta)/\delta = 1,16 \pm \sigma_{\alpha\beta}, \quad (6.11)$$

где $\sigma_{\alpha\beta} = 0,16$.

Формулы (6.9) и (6.10) приобретут вид

$$\alpha = (1,16 \pm 0,16)\varphi \quad (6.12)$$

и

$$\beta = (1,16 \pm 0,16)\chi. \quad (6.13)$$

Чем больше α по отношению к φ , тем больше средний развал бортов судна. Таким образом, формула (6.12) дает представление о характере шпангоутов.

Известный исследователь теоретического чертежа автор «Строевой теории» И. П. Аляев построил обводы минимости «Касатки» (1878) по формуле (аналогичной формуле (6.11)), но при $\sigma_{\alpha\beta} = -0,16$ [1]: $(\alpha\beta)/\delta = 1$, т. е. $\alpha/\varphi = 1$ и $\beta/\chi = 1$.

Как известно, φ является коэффициентом полноты строевой по шпангоутам, а χ — коэффициентом полноты строевой по ватерлиниям. На связь (6.9) и (6.10) указывает и форма таклаки упомянутых кривых.

Форма строевой по шпангоутам какого-либо судна сходна с формой ватерлиний этого судна и как бы осредняет их. Такая же связь существует между формой шпангоутов и формой строевой по ватерлиниям.



Рис. 6.5. Средняя ордината i -го шпангоута.

Строевая по шпангоутам может быть трансформирована таким образом, что ее ординаты будут средними ординатами соответствующих шпангоутов.

Действительно, ординаты строевой по шпангоутам равны площадям соответствующих шпангоутов

$$S_i = 2 \int_{x=0}^{x=l} y_{ij} dx \approx 2 \sum_{j=1}^{j=n} y_{ij} \Delta T, \quad (6.14)$$

где y_{ij} — ордината j -й ВЛ на i -м шпангоуте; n — число промежуточных между ВЛ подводной части.

При делении S_i на $2T$ мы получим среднюю ординату i -го шпангоута, которая будет средней всех ординат ВЛ, лежащих в плоскости i -го шпангоута (рис. 6.5):

$$\begin{aligned} (y_i)_{cp} &= \frac{S_i}{2T} = \frac{\int_0^l y_{ij} dx}{T} \approx \\ &\approx \sum_{j=1}^{j=n} y_{ij} \frac{\Delta T}{T} = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} \delta_{ij}}{n}. \end{aligned} \quad (6.15)$$

Из выражения (6.15) следует, что кривая средних ординат шпангоутов представляет строевую по шпангоутам, вертикальный ма-

штаб которой уменьшается в 27 раз. Ее ординаты — линейные величины. Строго говоря, это не плоская кривая, но удобно рассмотреть ее проекцию на горизонтальную плоскость, лежащую в том же значении y . При обычных обводах плоская, ограниченная кривой средних ординат, меньше площадью КВЛ; она будет средней по площади между затерленной подводной частью, а поэтому ее называют также средней водерлинией. Коэффициент полноты кривой средних ординат равен ϕ , абсцисса ее ЦТ равна абсциссе ЦВ x_c .

Аналогично можно рассмотреть и строювую по водерлиниям. Площадь интервала

$$S_j = 2 \int_{x_{j-1}}^{x_j} y_j dx \approx 2 \sum_{i=1}^m y_{ij} \Delta L, \quad (6.16)$$

где m — число штабов.

Средняя ордината строювой по водерлиниям

$$\langle y \rangle_{ср} = \frac{S_j}{2L} = \frac{\int_{x_{j-1}}^{x_j} y_j dx}{L} \approx \frac{\sum_{i=1}^m y_{ij}}{m}. \quad (6.17)$$

Соответствующая кривая средних ординат $\langle y \rangle_{ср}$ будет иметь, в отличие от строювой, линейные ординаты. Эти ординаты оказываются меньше ординат наиболее полного шпангоута (коэффициент полноты β). Вид кривой средних ординат сходен с овертанной шпангоутом. Кривую средних ординат можно назвать шпангоутом средней площади с коэффициентом полноты χ ; аппроксимат ее ЦТ совпадает с аппроксимат ЦВ x_c . Обвод этой кривой используется для определения смоченной поверхности (см. 9.8).

6.5. Определение коэффициента полноты мидель-шпангоута

Коэффициент полноты шпангоутов наибольшего сечения β обычно называют коэффициентом полноты мидель-шпангоута. У большинства судов с относительно малыми скоростями $Fr < 0,38$ шпангоут наибольшего сечения совпадает с мидель-шпангоутом, лежащим посредине длины судна; у более быстрых судов они не совпадают. Для них β определяется по площади шпангоута наибольшего сечения.

Статистическое обследование большого количества судов позволяет подтвердить справедливость (6.13): $\beta = (1,16 \pm 0,16) \chi$.

А. Н. Ванденно предположил формулу

$$\beta = 1 - 3,5(1 - \chi)^2 \pm 0,004,$$

которая дает хорошие результаты для большинства судов, однако она непригодна для судов с булевыми (быстротечными) шпангоутами.

Следует учитывать особое значение коэффициента β . Он вместе с тремя главными размерениями L , B , T входит в выражение для водизмещения κ , как правило, записывается сразу после опреде-

ления водозаполнения (см. 4.1). Таким образом, коэффициент β служит основой для расчетов других коэффициентов полноты, а сам определяется в зависимости от числа Фруда (см. 9.10 и рис. 9.10).

В связи с этим особый интерес представляет зависимость $\beta = f(Fr)$, установленная статистикой. На ее характер значительно влияет скорость судна.

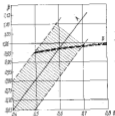


Рис. 6.6. Связь коэффициентов полноты β и δ : Δ — по формуле (6.18); δ — по формуле (6.19).

Для быстротечных судов ($Fr > 0,38$)

$$\beta = 1,026 + \Delta\beta, \quad (6.18)$$

где $\Delta\beta = \pm 0,15$ — наибольшее по абсолютной величине отклонение. При $\delta > 0,53$ может оказаться, что $\beta > 1$ (возможно появление бугорчатого обвода у скоростного судна).

Для относительно тихоходных судов ($Fr < 0,38$), к которым принадлежит большинство грузовых, характерны плоское днище и прямые борты; коэффициент полноты шпангоута наибольшего сечения у них близок к единице, но не превышает ее. Для таких судов при $\delta < 0,60$

$$\beta = 1,014\delta \pm 0,004. \quad (6.19)$$

Эта формула резко отличается от (6.18).

При $\delta = 0,80$ получаем $\beta = 0,985 \pm 0,04 = 0,991 \pm 0,009$, т. е. максимальное значение β почти не отличается от единицы. При $\delta \geq 0,80$, характерных для большинства танкеров, β принимается таким же, как и при $\delta = 0,80$.

Зависимость (6.19) может быть линеаризована путем простых преобразований:

$$\beta = 1,014 \sqrt[12]{1 - (1 - \delta)} \pm 0,004 \approx 1,014 \left[1 - \frac{1}{12}(1 - \delta) \right] \pm 0,004 = 0,998 + 0,085\delta \pm 0,004. \quad (6.20)$$

Последняя формула близка к формулам, полученным Л. М. Ногидом для средней величины β [63].

На рис. 6.6 показаны кривые, построенные по формулам (6.18) и (6.19).

6.6. Определение коэффициента продольной острог

Зная δ и β , можно получить коэффициент продольной острог $\varphi = \delta/\beta$, который является одновременно и коэффициентом полноты строевой по шпангоутам, а также средней ватерлинии (кривой средних ординат шпангоутов).

Для тилкоходных судов ориентировочное значение данного коэффициента можно получить из формулы

$$\varphi_{\text{тл}} \approx \frac{\delta}{1,014\delta^{1,12}} = 0,985\delta^{1,12} \quad (6.21)$$

или

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{тл}} &= 0,985(1 - (1 - \delta))^{1,12} \approx 0,985 \left[1 - \frac{11}{12}(1 - \delta) \right] = \\ &= 0,903\delta + 0,082. \end{aligned} \quad (6.22)$$

Формула (6.22) показывает, как мало отклоняется у тилкоходных судов $\varphi_{\text{тл}}$ от $\delta_{\text{тл}}$ ($\varphi_{\text{тл}} - \delta_{\text{тл}} = 0,082 - 0,097 \delta$). Поэтому при грубой оценке величин, зависящих от δ или от φ , для таких судов можно считать $\varphi_{\text{тл}} \approx \delta_{\text{тл}}$.

У быстроходных судов, как следует из выражения (6.18), $\varphi_{\text{бл}} = \delta/1,62$ и $\delta = 0,62 \varphi = \text{const}$.

Статистический анализ данных по ряду таких судов позволяет принять следующую зависимость:

$$\varphi = \varphi_{\text{бл}} + \Delta\varphi = 0,62 \pm 0,07. \quad (6.23)$$

При пользовании приближенными формулами надо четко представлять себе, к какой скоростной группе судов принадлежит проектируемое судно.

Некоторые дополнительные соображения о величине φ изложены в гл. 9, где рассматривается влияние ходкости судна на характеристики его формы.

6.7. Определение коэффициента полноты конструктивной (грузовой) ватерлинии

Формула (6.9), вытекающая из (6.8), указывает на связь коэффициента полноты конструктивной ватерлинии α с коэффициентом продольной острог φ . На существование этой связи указывает и форма линий, ограничивающих площадь с коэффициентом пол-

ноты α (КВЛ) и с φ (строевая по шпангоутам, средняя ватерлиния, кривая средних ординат шпангоутов).

Статистический анализ показывает, что зависимость, предложенная Лидделем при введении в нее поправочного коэффициента α' :

$$\alpha_{\text{тл}} = \alpha' \varphi^{2,5}, \quad (6.24)$$

точнее формулы (6.8), особенно для судов с полными обводами, так как в формуле (6.24) α с увеличением φ растет медленнее, чем по (6.8).

Можно учесть колебания α , введя меру колеблемости в зависимость (6.24):

$$\alpha = (\alpha + \Delta\alpha) \varphi^{2,5}, \quad (6.25)$$

где для современных судов $\alpha = 0,985$, $\Delta\alpha = \pm 0,075$ — наибольшее отклонение.



Рис. 6.7. Соответствие форм обводов шпангоутов отклонением во формуле (6.25).

Следует еще раз обратить внимание на то, что от коэффициента $(\alpha + \Delta\alpha)$ зависит форма шпангоута, поскольку чем больше $\Delta\alpha$ при одном и том же φ , тем больше шпангоуты приближаются к V-образным. Например, при $\alpha = |\Delta\alpha| = 0,985 - 0,075 = 0,91$ обводы будут U-образные, при $\alpha + |\Delta\alpha| = 0,985 + 0,075 = 1,06$ — V-образные (рис. 6.7).

Преобразуя формулу (6.25), получаем

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{тл}} &= \alpha(1 - (1 - \varphi))^{2,5} = 0,985 \left[1 - \frac{2}{3}(1 - \varphi) \right] = \\ &= 0,554\varphi + 0,33 \approx \frac{2}{3}\varphi + \frac{1}{3}. \end{aligned} \quad (6.26)$$

Существует множество формул такого типа. Формулы Бауэра и Кэри практически совпадают с выражением (6.26).

Формула $\alpha = 0,67 \varphi + 0,3 \pm 0,07$ получена путем статистической обработки данных по большой группе быстроходных судов.

Л. М. Ногид предложил формулу $\alpha_{\text{тл}} = 0,86 \varphi + 0,18$, пригодную для широкого диапазона изменения $\varphi = (0,55 - 0,8)$.

Представляет интерес зависимость α от δ .
Для судов, имеющих $Fr < 0,28$, можно получить, используя зависимость (6.24) и (6.21),

$$\alpha_{0.28} = 0,985 \delta^{0.23} = 0,985 (0,985 \delta^{11/27})^{0.23} = 0,975 \delta^{1.18} = 0,975 \delta^{1.2} \delta^{0.18} \quad (6.27)$$

Вычисление по формуле (6.27) не представляет никаких затруднений и может быть выполнено на трехзначной логарифмической линейке. Можно ввести в формулу (6.27) меру колеблемости. Однако обычно приближимо $\alpha_{0.28} \approx \alpha \delta^{1.2}$. На основании формулы (6.27) $\alpha = 0,975 \delta^{0.9}$. Принимая среднюю величину α , получаем $\alpha_{0.28} = 0,97 \delta^{1.2}$.

Хорошие результаты дает формула

$$\alpha = 0,985^{1.2} \pm 0,06, \quad (6.28)$$

которая соответствует данным, приведенным Ландбладом для транспортных судов [64].

Для промысловых судов Нгуен-Куанг-Вань вывел формулу [61]:

$$\alpha = (1,065 \pm 0,042) \delta^{1.2}, \quad (6.29)$$

из которой видно, что шпангоуты этих судов имеют больший развал, чем шпангоуты транспортных судов.

Получить отсюда, что выражение (6.27) позволяет приближенно оценить зависимость χ от δ для судов с $Fr < 0,28$:

$$\chi_0 = \frac{\delta}{\alpha} = \frac{\delta}{0,975 \delta^{1.2} \delta^{0.18}} = 1,025 \delta^{-0.18} \approx 1,025 [1 - (1 - \delta)^{0.18}] = -0,82 + 0,6\delta.$$

6.8. Связь между возмущением метacentра, размеренками и коэффициентами полноты судна

Вопрос об определении возмущения метacentра над основной линией в функции размерений и коэффициентов полноты судна важен для учета начальной остойчивости на первых этапах проектирования.

Указанный вопрос включает определение аппликаты ЦВ z , измеренной от основной плоскости (ОП), и поперечного метacentрического радиуса ρ в зависимости от главных размерений и коэффициентов полноты судна.

Основой определения этих величин является формула В. Шмидта (6.1). Приближенные значения z и ρ находят в результате допущений о форме судна, а коэффициент — на основании статистической обработки данных по ряду судов.

Для определения z и ρ могут быть использованы и формулы, прямо опирающиеся на статистику, но и в них учитывается геометрический фактор.

Площадь строевой по любую ватерлинию равна объемному возмущению до этой в.л., а аппликата ЦТ этой площади — соответствующая аппликата ЦВ судна. Поэтому можно, задав форму строевой, получить выражение для z . Таким способом значение z было получено Окуниным, Моррином и Поддониным.

Л. П. Эйлер применял другой способ и предложил формулу для z , непосредственно рассмотрев ряд форм подводной поверхности судна, закончив этот процесс интерполяцией.

Так как для определения метacentрического радиуса необходимо знать момент инерции площади ватерлинии, Эйлер рассмотрел формы ватерлиний для крайних значений α и вывел формулу для ρ .

А. П. Фан-дер-Флит получил ρ , считая, что площадь ватерлинии ограничивается параболической кривой. Ниже даны конкретные результаты применения указанных методов.

6.9. Формулы Эйлера, Окунива и Нормана для z

Строевая до в.л. может быть задана параболой типа

$$S_x = k_2 \cdot x^2, \quad (6.30)$$

Для этой параболы ОП является касательной при $z = 0$ (рис. 6.8).



Рис. 6.8. Параболическая строевая по ватерлинии: A — по Эйлеру [формула (6.30)]; B — по Окуниву [формула (6.31)].

Условие равенства площади строевой подвозмущению позволяет записать

$$V = \int_{x=0}^{x=l} S_x dx = k_2 \int_{x=0}^{x=l} x^2 dx = k_2 \frac{l^3}{3}.$$

Учитывая, что $V = \delta LBT^3$, $k_2 = S_T/T^3$, получаем $\delta LBT^3 = \alpha LBT^3 / (n + 1)$.

Отсюда показатель степени параболы $n = (n/\delta) - 1$, т. е.

$$S_x = k_2 x^{n+1}.$$

* Здесь и далее коэффициент числителя частей k , значение которого базисно и постоянно, не указывается, так как выводится приближенными формулами.

Статистический момент площади створовой по параметрам относительно ОЛ

$$M_T = VZ_c = k_3 \int_{z=0}^{z=T} z^2 dz - k_3 \int_{z=0}^{z=T} z^{n+1} dz = k_3 \frac{T^{n+2}}{n+2} = \frac{\alpha \delta T^3}{(\alpha \delta) + 1} = \frac{\alpha \delta^2 T^2}{\alpha + \delta} = \frac{\alpha}{\alpha + \delta} VT.$$

Откуда

$$z_c = \frac{M_T}{V} = \frac{\alpha}{\alpha + \delta} T = \frac{\alpha \delta}{(\alpha \delta) + 1} T = \frac{1}{1 + (\delta/\alpha)} T. \quad (6.31)$$

Идея, которая положена в основу вывода этой формулы, принадлежит В. Л. Подольнику. Однако сама формула получена Л. П. Зайнером много раньше (в 70-е г. XVIII в.) другим способом (табл. 6.1) [4].

Вывод формулы (6.31) по схеме Зайлера

Таблица 6.1

Формы подводящей части	Коэффициент вертикальной площади δ/α	Отношение площади волнового шлюза к площади шлюза α/δ	Относительное значение ЦВ над осевой линией z_c/T
Вертикальный форт, являясь линией (прямоугольные шлюзы)	1	1/2	$\frac{z_c}{T} = \frac{1}{1+1} = \frac{1}{1+\frac{\delta}{\alpha}}$
Треугольные шлюзы с вершиной на ОЛ (вертикальные обрамления шлюза)	1/2	2/3	$\frac{z_c}{T} = \frac{1}{1+\frac{1}{2}} = \frac{1}{1+\frac{\delta}{\alpha}}$
Параболы с вершиной на ОЛ (вертикальные обрамления шлюза)	1/3	3/4	$\frac{z_c}{T} = \frac{1}{1+\frac{1}{3}} = \frac{1}{1+\frac{\delta}{\alpha}}$

Для трех видов форм подводящей части судна, указанных в табл. 6.1,

$$z_c = \frac{\alpha \delta}{(\alpha \delta) + 1} T = \frac{\alpha}{\alpha + \delta} T = \frac{1}{1 + (\delta/\alpha)} T.$$

Предположение о том, что створая подчиняется закону $S_c = -k_3 z^{n+1}$ или что допустима интерполяция величин, соответствующих трем случаям, рассмотренным в табл. 6.1, является некоторым упрощением.

Формула (6.31) на основании статистических данных позволяет найти поправочный коэффициент:

$$z_c = k_3 \frac{\alpha}{\alpha + \delta} T; \quad (6.32)$$

здесь, как правило, $k_3 > 1$. Для быстроходных судов ($Pr > 0,28$) может быть принято $k_3 = 1,017 \pm 0,023$.

Распределение отклонений k_3 показано на рис. 6.9.

Принимая на основании (6.31) $z_c = f(\alpha, \delta) T$, можно получить ряд формул путем статистической обработки данных по судам. В частности, Л. М. Носад вывел такую формулу для среднего значения z_c :

$$z_{cp} = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\delta} \right)^{1/2} T. \quad (6.33)$$

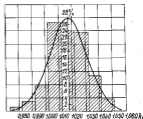


Рис. 6.9. Распределение отклонений k_3 от среднего значения α/δ по формуле (6.33) для быстроходных судов.

Преобразуя эту формулу, можно получить

$$\begin{aligned} \frac{z_{cp}}{T} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\delta} \right)^{1/2} = \frac{1}{2 \sqrt{\delta/\alpha}} = \frac{1}{2 \sqrt{1 - \left(1 - \frac{\delta}{\alpha}\right)}} \approx \\ &\approx \frac{1}{2 \left[1 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\delta}{\alpha}\right) \right]} = \frac{1}{2 - 1 + \frac{\delta}{\alpha}} = \\ &= \frac{1}{1 + \frac{\delta}{\alpha}} = \frac{\alpha}{\alpha + \delta}. \end{aligned}$$

Иначе говоря, формулу (6.33) можно привести к виду (6.31). Однако различие между обеими формулами усиливается по мере увеличения разности между $\sqrt{1 - \left(1 - \frac{\delta}{\alpha}\right)} \approx 1 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\delta}{\alpha}\right)$ и тем больше, чем меньше δ/α .

В пределах $\delta/\alpha = 0,6 - 0,9$ формула (6.33) дает тот же результат, что и зависимость $z_{cp} = 1,017 [\alpha/(\alpha + \delta)] T$. Для $(\delta/\alpha) < 0,6$ формула (6.33) не пригодна.

Подробнее рассмотрев формулы Эйлера и Нотта, через предельную формулу [93]:

$$\left(\frac{r}{T}\right)_{\infty} = 0,53 \sqrt{\frac{\alpha}{\delta}} \quad \kappa$$

$$\left(\frac{r}{T}\right)_{\infty} = \sqrt{\frac{\alpha\delta}{\delta}}$$

Формула М. М. Окулова для аппликат ЦВ была опубликована в 1936 г., впоследствии забыта и вновь получена А. П. Фан-дер-Флитом в начале XX в. Она основывается на изображении стroyной по ватерлиниям в виде параболы (см. рис. 6.8), имеющей вертикальную касательную при КВЛ:

$$S_y = S_T - k_3 (T-z)^n,$$

где S_T — площадь КВЛ; k_3 — коэффициент пропорциональности. Для основной линии $S_y = 0$; $Z = 0$; отсюда

$$k_3 = S_T/T^n \quad \kappa$$

$$S_y = S_T \left[1 - \left(1 - \frac{z}{T} \right)^n \right]. \quad (6.34)$$

Производная S_y по переменной осадке

$$\frac{dS_y}{dz} = n \frac{S_T}{T} \left(1 - \frac{z}{T} \right)^{n-1}.$$

Отсюда:

1) при $z = 0$

$$\left. \frac{dS_y}{dz} \right|_{z=0} = n \frac{S_T}{T},$$

т. е. стroyная подходит к ОЛ под углом, не равным нулю;

2) при $z = T$

$$z = T \left(\frac{dS_y}{dz} \right)_{z=T} = 0$$

т. е. стroyная подходит перпендикулярно к КВЛ.

Парабола (6.30) обладает следующими свойствами. Она касается ОЛ в начале координат и пересекает КВЛ под углом, не равным прямому.

Площадь стroyной (6.34) по ватерлиниям равна объемному водозапасанию:

$$V = \int_{z=0}^{z=T} S_y dz = \int_{z=0}^{z=T} S_T \left[1 - \left(1 - \frac{z}{T} \right)^n \right] dz =$$

$$= S_T \int_{z=0}^{z=T} dz - S_T \int_{z=0}^{z=T} \left(1 - \frac{z}{T} \right)^n dz =$$

$$= S_T T + S_T T \int_{z=1}^{z=0} u^n dz.$$

В последнем интеграле $u = 1 - (z/T)$;

$$dz = - \frac{dz}{T}.$$

Отсюда

$$V = S_T T \left(1 + \left| \frac{u^{n+1}}{n+1} \right|_{z=0}^{z=T} \right) = S_T T \left(1 - \frac{1}{n+1} \right) =$$

$$= S_T T \frac{n}{n+1} = \alpha L B T \frac{n}{n+1} = \delta L B T$$

и

$$\alpha \frac{n}{n+1} = \delta; \quad \frac{\delta}{\alpha} = \frac{n}{n+1},$$

т. е.

$$n = \frac{\delta/\alpha}{1 - (\delta/\alpha)} = \frac{\delta}{\alpha - \delta}.$$

Слиточный момент площади стroyной по ватерлиниям относительно ОЛ

$$M_T = Vz = \int_{z=0}^{z=T} S_y z dz = S_T \int_{z=0}^{z=T} \left[1 - \left(1 - \frac{z}{T} \right)^n \right] n z dz =$$

$$= S_T \left[\int_{z=0}^{z=T} n z dz - \int_{z=0}^{z=T} \left(1 - \frac{z}{T} \right)^n n z dz \right] =$$

$$= S_T \left[\frac{1}{2} T^2 + \int_{z=1}^{z=0} \frac{d^n}{dz^n} (1-z)^n T^2 dz \right] =$$

$$= S_T T^2 \left[\frac{1}{2} + \int_{z=1}^{z=0} u^n du - \int_{z=1}^{z=0} u^{n+1} du \right] =$$

$$= S_T T^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{n+1} + \frac{1}{n+2} \right) =$$

$$= \alpha L B T^3 \frac{\frac{1}{2} \left(2 - \frac{\delta}{\alpha} \right) - \left(1 - \frac{\delta}{\alpha} \right) \left(2 - \frac{\delta}{\alpha} \right) + 1 - \frac{\delta}{\alpha}}{2 - \frac{\delta}{\alpha}} =$$

$$= \alpha L B T^3 \frac{1,5 \frac{\delta}{\alpha} - \left(\frac{\delta}{\alpha} \right)^2}{2 - \frac{\delta}{\alpha}} = \delta L B T^3 \frac{1,5 \frac{\delta}{\alpha} - \left(\frac{\delta}{\alpha} \right)^2}{2 - \frac{\delta}{\alpha} - \left(\frac{\delta}{\alpha} \right)^2} =$$

$$= VT \frac{1,5 \frac{\delta}{\alpha} - \left(\frac{\delta}{\alpha}\right)^2}{2 \frac{\delta}{\alpha} - \left(\frac{\delta}{\alpha}\right)^2} = VT \frac{1,5 - \frac{\delta}{\alpha}}{2 - \frac{\delta}{\alpha}}$$

Отсюда

$$z_1 = \frac{M_T}{V} = \frac{1,5 - (\delta/\alpha)}{2 - (\delta/\alpha)} T. \quad (6.35)$$

Формула (6.35) дает большие значения z_1 при тех же δ/α и T , чем зависимость (6.31), что следует и из рассмотрения рис. 6.10.

Норман оубликовал формулу для определения z_1 без какого-либо теоретического обоснования, только с указанием, что она пригодна для ряда судов.

Приведем вывод этой формулы по Моррису. Рассмотрим четырехугольник АЕМК (см. рис. 5.3). В нем

$$S_T = \alpha LB = \overline{AE} = \overline{KF}; \quad T = \overline{AK} = \overline{EF}.$$

Проведя линию \overline{CO} , параллельную оси z , на расстоянии от нее $\overline{KC} = \delta LB$, получаем прямоугольник АКСG, площадь которого равна V , т. е. площади стрелы ($\overline{KC} \cdot \overline{AK} = \delta LB T$). В пересечении диагонали \overline{AF} с \overline{CG} можно провести горизонтальную прямую \overline{NP} . Из подобия треугольников \overline{AKF} и \overline{ANM} следует

$$\frac{\overline{AK}}{\overline{KF}} = \frac{T}{\alpha LB} = \frac{\overline{AN}}{\overline{NM}} = \frac{\overline{AN}}{\delta LB};$$

отсюда

$$\overline{AN} = \overline{NM} = \overline{EP} = \frac{\delta}{\alpha} T.$$

Площадь четырехугольника АЕРN равна

$$\overline{AE} \cdot \overline{AN} = \alpha LB \frac{\delta}{\alpha} T = \delta LB T = V.$$

Таким образом, площади четырехугольников \overline{GERM} и \overline{NMCK} оказываются равными. Следовательно, равны и половины этих площадей: $\Delta GEM = \Delta MCK$. В результате площадь стрелы может быть получена из площади ΔGCK перемещением площади ΔMCK в контур ΔGEM равной площади. Отсюда статический момент относительно OJ для новой фигуры $M_T =$ (момент площади ΔGCK) + (момент площади ΔGEM) = (момент площади ΔMCK).

Обозначив площадь ΔGEM через V_A , получаем

$$V_A = \frac{1}{2} \overline{GE} \cdot \overline{GM} = \frac{1}{2} (\alpha - \delta) LB \frac{\delta}{\alpha} T = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\delta}{\alpha}\right) V.$$

Таким образом,

$$\begin{aligned} M_T &= V \frac{T}{2} + V \frac{T}{2} \left(1 - \frac{\delta}{\alpha}\right) \left(1 - \frac{1}{3} \frac{\delta}{\alpha}\right) - \\ &= V \frac{T}{2} \left(1 - \frac{\delta}{\alpha}\right) \frac{1}{3} \left(1 - \frac{\delta}{\alpha}\right) - \\ &= \frac{VT}{2} \left[1 + 1 - \frac{\delta}{\alpha} - \frac{1}{3} \frac{\delta}{\alpha} + \frac{1}{3} \left(\frac{\delta}{\alpha}\right)^2 - \frac{1}{3} + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{3} \frac{\delta}{\alpha} - \frac{1}{3} \frac{\delta}{\alpha} - \frac{1}{3} \left(\frac{\delta}{\alpha}\right)^2\right] = VT \frac{2,5 - (\delta/\alpha)}{3}. \end{aligned}$$

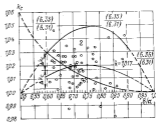


Рис. 6.10. Отношение z_1/T по различным формулам к значению этой величины по Эйлру (формула (6.31)).

Аппликата ЦВ:

$$z_2 = \frac{M_T}{V} = \frac{2,5 - (\delta/\alpha)}{3} T = \left(0,833 - 0,333 \frac{\delta}{\alpha}\right) T. \quad (6.36)$$

Заметим, что Норман предложил формулу не для z_1 , а для отношения ЦВ от КВЛ:

$$T - z_2 = \frac{0,6 + (\delta/\alpha)}{3} T = \left(0,167 + 0,333 \frac{\delta}{\alpha}\right) T.$$

Записав формулу (6.36) в виде дроблеца $z_2 = \left(\alpha - \delta \frac{\delta}{\alpha}\right) T$,

можно попытаться определить α и δ статистическим способом. Таким образом, была получена формула, в которую внесена величина наибольшего отклонения:

$$z_2 = \left(0,858 - 0,370 \frac{\delta}{\alpha} \pm 0,025\right) T. \quad (6.37)$$

Два первых члена этой формулы дают результат, близкий к (6.36).

На рис. 6.10 даны отклонения z_1 , найденных по формулам (6.33), (6.35) и (6.36), к величине z_0 , вычисленной по формуле Эйлера (6.31), а также отклонения z_2 для ряда судов к той же величине, полученной по зависимости (6.31). Из рисунка видно, что формула (6.31) без поправки дает заниженный результат, выражение (6.35) — завышенный. Из выражения (6.36) находим среднее значение z_2 без поправки, что, в частности, показывает, насколько четырехугольник Морриса хорошо представляет строевую по ВЛ и распределение объема судна по высоте.

6.10. Зависимость метacentрического радиуса от главных размеров и коэффициентов полноты

Поперечный (малый) метacentрический радиус определяется по известной точной формуле $r = I_x/V$, в которой I_x — момент инерции плоскости КВЛ (ГВЛ) относительно главной продольной оси инерции x (как правило, лежащей в ДП судна).



Рис. 6.11. Прямая форма ватерлиней по Эйлеру.

Эйлер определил эту величину следующим образом [5]. Он считал, что все ватерлинии заключены между ромбической ($\alpha = 0,5$) и прямоугольной ($\alpha = 1$) ватерлиниями (рис. 6.11), для которых соответственно $I_x = LB^3/48$ и $I_x = LB^3/12$.

Принимая I_x увеличивающимся с ростом α , можно предположить, что для всех ватерлиний, лежащих между ромбической и прямоугольной ватерлиниями, $I_x = \alpha^2 (LB^3/12)$. Чтобы удовлетворить крайним значениям коэффициента α^2 при $LB^3/12$, следует принять $\alpha = 2$. Отсюда

$$r = \frac{I_x}{V} = \frac{\alpha^2 LB^3}{12 \cdot 0,87} = \frac{\alpha^2}{8} \frac{B^3}{12T}. \quad (6.38)$$

Учитывая, что отношение $B^3/12T$ представляет собой метacentрический радиус прямоугольного полнота, можем считать, что отношение $\alpha^2/8$ играет здесь как бы роль коэффициента полноты для r .

Рассмотрев вывод формулы для r по Эйлеру, можно установить некоторые причины ее неточности.

Во-первых, промежуточные значения I_x при $0,5 < \alpha < 1,0$ определены по закону, который может иметь отклонения. Во-вторых,

при $\alpha = 0,5$ реальная ватерлиния будет S-образной, а не ломкой линией.

Все это заставляет ввести в (6.38) коэффициент, а в него меру колеблемости:

$$r = k_p \frac{\alpha^2}{8} \frac{B^3}{12T}, \quad (6.39)$$

где $k_p = k_{p0} \pm 0,05$.

Величина k_p зависит от формы ватерлинии и является как бы вторичной после α ее характеристикой.

Для S-образных ватерлиний $k_p = 1,05 \pm 0,05$, для выпуклых (без перегиба) $k_p = 1,03 \pm 0,05$ (здесь 0,05 — наибольшее отклонение).

Величина (6.8) или (6.9) влияет на форму КВЛ, поэтому, анализируя эти зависимости, Б. А. Царев предложил [93] рассматривать k_p как функцию величины $(\alpha/\beta)^2 = \alpha^2/\beta$. Эта зависимость по Цареву будет $(\alpha/\beta)^{1/3}$.

Изменения со временем приняты формы ватерлиний сделали непригодными известные формулы Нормана, полученные им около ста лет назад для судов с резко выпуклыми S-образными ватерлиниями (они дают заниженное значение r) [93].

А. П. Фан-дер-Флат вывел в начале XX в. формулу, похожую на выражение (6.38), путем интегрирования параболической ватерлиней (см. гл. 9). Выраженная для ватерлиней для кораблей типа этих ватерлиней при их симметричности относительно оси yy (рис. 6.12) дана еще Чарльзом:

$$y = \frac{B}{2} \left[1 - \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right],$$

где $\alpha = \alpha(1-\alpha)$.

Для этих ватерлиней

$$\begin{aligned} I_x &= 2 \frac{B}{3} \int_{x=0}^{\alpha L/2} y^2 dx = \frac{B^3}{6} \int_{x=0}^{\alpha L/2} \left[1 - \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right]^2 dx = \\ &= \frac{B^3}{6} \int_{x=0}^{\alpha L/2} \left[1 - 3 \left(\frac{x}{L} \right)^2 + 3 \left(\frac{x}{L} \right)^4 - \left(\frac{x}{L} \right)^6 \right] dx = \\ &= \frac{LB^3}{12} \left(1 - \frac{3}{\alpha+1} + \frac{3}{2\alpha+1} - \frac{1}{3\alpha+1} \right). \end{aligned}$$

После подстановки $\alpha = \alpha(1-\alpha)$ и некоторых преобразований имеем

$$I_x = \frac{6\alpha^2}{3 \cdot 1 - 3\alpha + \alpha} \frac{LB^3}{12}$$

и

$$r = \frac{I_x}{V} = k_p \frac{\alpha^2}{8} \frac{B^3}{12T}, \quad (6.40)$$

где $k_0 = \frac{6}{3 + 2\alpha + \frac{1}{\alpha}}$ — коэффициент (рис. 6.13), достигающий максимума при $\alpha = \sqrt{2/3} = 0,707$.

Сам А. П. Фан-дер-Вант предлагает формулу (6.40) в несколько другом виде:

$$\rho = \frac{1}{12k_0} \frac{a^2}{\delta} \frac{\delta^3}{T}$$



Рис. 6.12. Параболическая ватерлиния.

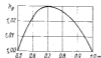


Рис. 6.13. Значения коэффициента k_0 в формуле (6.40).

Рассмотрев границу ($12/\delta k_0$) = 11,4; при этом $k_0 = 1,06$, т. е. близко к среднему значению, соответствующему 5-образной ватерлинии. Коэффициент k_0 , получившийся для параболической ватерлинии при $\alpha = 0,707$, близок к его средней величине для выпуклых ватерлиний.



Рис. 6.14. Ватерлиния выпуклая и 5-образная.

Попутно можно отметить, что значение продольного (большого) метастерического радиуса R может быть получено по той же схеме. Достаточно рассмотреть те же фигуры на рис. 6.11, но брать момент инерции I_y относительно оси yy . Выражение для R будет иметь вид

$$R = k_R \frac{\alpha^2}{\delta} \frac{L^3}{12F} \quad (6.41)$$

Значение коэффициента k_R значительно меньше, чем k_0 , что объясняется распределением площади ватерлинии, концентрирующейся у середины длины судна. Для судна с выпуклыми ватерлиниями $k_R = 0,50 \pm 0,03$, где 0,03 — наибольшее отклонение.

По рис. 6.14, где изображены две ватерлинии с одинаковым α , можно установить, что в зависимости от форм ватерлинии, связанной с распределением ее площади, коэффициент k_R меняется, возрастает по мере увеличения площади оконечностей судна, что способствует росту I_y . Коэффициент k_R при уменьшении площади оконечностей и неизменности волюк волнучины площади увеличится.

Таким образом, оказывается, что сумма коэффициентов k_0 и k_R для ватерлинии с определенным коэффициентом волюкы меняется незначительно. Это дает основание для предположения: $k_0 + k_R = A + \Delta A$. По данным статистики, $A = 1,93$, наибольшее отклонение $\Delta A = \pm 0,03$. Отсюда

$$k_R = 1,93 - k_0 \pm 0,03. \quad (6.42)$$

По формуле (6.42) можно определять k_R , когда известно k_0 .

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОСТОЙЧИВОСТИ И ПЛАВНОСТИ КАЧКИ СУДНА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

7.1. Поперечная метacentрическая высота как характеристика остойчивости судна. Относительная метacentрическая высота

Известно, что поперечная метacentрическая высота совместно с водоизмещением D' в метacentрах определяет восстанавливающий момент при малых наклонениях судна.

Метacentрическая формула, выражающая равенство кренящего и восстанавливающего моментов, позволяет установить равновесный угол крена θ на тихой воде. Формула пригодна в случае малых наклонений и имеет вид

$$M = D'h \sin \theta = Dgh \sin \theta \quad (7.1)$$

или

$$M \approx D'h\theta = Dgh\theta. \quad (7.2)$$

Условие малости θ , на основании которого занисано последнее выражение, сформулировано еще Эйлером, считавшим большие наклонения судна перальными и, следовательно, учет таких наклонений ненужным.

Для большинства судов, имеющих относительно высокий надводный борт, это положение действительно и сегодня. Однако для низкобортовых судов оценка их остойчивости только по метacentрической формуле может привести впоследствии к катастрофе.

В 1870 г. во время парусных гонок перевернулся и погиб почти со всей командой английской низкобортовой багвинный бронзовец «Кетфейн». Для этого корабля ровным оказалось стремление проектировщиков соединить в одном объеме отличительные черты монитора, а тем числе низкий надводный борт, с развитым парусным вооружением, которое по традиции считалось тогда обязательным для крупных боевых кораблей. К тому же он был при постройке перегружен, что привело к дальнейшему уменьшению его надводного борта [35]. Действие ветра на громадную парусность корабля заставляло его крениться на угол, превышающий 14° , при котором палуба начинала заходить в воду. Примечательно, что изобретатель габела «Кетфейна» Д. Э. Рад — главный конструктор британского флота, возражавший против проекта «Кетфейна», предложил диаграмму, позволяющую оценивать остойчивость судна при больших углах крена. Она и позволяла объяснить причины гибели «Кетфейна». С тех пор диаграмма поперечной остойчивости стала

обязательной частью проектной документации. По инициативе А. Н. Крылова в России она получила название диаграммы Рада.

Оценка остойчивости на больших углах крена обычно производится после того, как определены главные размерения, коэффициенты формы судна, построены теоретический чертёж и составлена нагрузка.

Противоречивость требований к метacentрической высоте с точки зрения обеспечения безопасности плавания и некоторых других эксплуатационных условий заставляет при назначении ее широко использовать данные прототипов, которые позволяют установить статистическую связь между метacentрической высотой, шириной и водоизмещением судна \bar{H} .

В настоящее время метacentрическую высоту связывают с шириной судна, имея понятие относительной метacentрической высоты: $\bar{h} = h/B$. Оценить значение \bar{h} можно, рассматривая крен судна при перекачке груза. Считая, что вес этого груза gP и плечо перекачки груза l_0 пропорциональны водоизмещению $gD = k_1 gD$ и ширине $l_0 = k_2 B$ судна, получаем на основании выражения (7.2):

$$\theta = \frac{M}{gDh} = \frac{gP l_0}{gDh} = \frac{k_1 k_2 h_0 \theta}{h} = k_1 k_2 \frac{B}{h} = \frac{k_1 k_2}{\bar{h}}. \quad (7.3)$$

Таким образом, угол крена θ обратно пропорционален \bar{h} . При одинаковом значении \bar{h} у судов разных размеров угол крена θ также будет постоянным (если, конечно, коэффициенты пропорциональности k_1 и k_2 неизменны).

Таким же результатом можно получить, рассматривая затопление бортовых отсеков, объем которых считается пропорциональным водоизмещению. Другие результаты получаются при рассмотрении крена от действия ветра.

Кренящий момент от действия ветра

$$M = p_p A_c z_p \quad (7.4)$$

где p_p — удельное давление ветра на боковую поверхность судна; z_p — плечо кренящего момента; A_c — боковая поверхность надводной части судна (площадь парусности судна).

Принимаем

$$z_p = k_p H = k_p V^{0.5}, \\ A_c = k_A V^{2.5},$$

получаем

$$M = p_p k_p k_A V,$$

отсюда

$$\theta = \frac{M}{gDh} = \frac{p_p k_p k_A}{gD} \frac{V}{D} = \frac{p_p k_p k_A}{gD} \frac{1}{\bar{h}}, \quad (7.5)$$

где p_p — плотность воды.

Таким образом, крен судов, для которых опасно действие ветра на их боковую поверхность, обратно пропорционален абсолютной метacentрической высоте. Речь идет о судах с сравнительно малым надводным бортом и большой пурхотностью (разветвляе надстройкой), т. е. в основном о современных малых судах ($B = 10-12$ м). Для них надо учитывать \bar{h} и обязательно, особенно для гражданских судов, проверять устойчивость по диаграмме Рада (по Правилам Регистра СССР).

Следует обратить внимание на то, что \bar{h} меняется с изменением размеров судна и требований к нему меньше, чем h .

Ограничение угла крена требует повышения как h , так и \bar{h} . Если, например, в процессе проектирования судна, имеющего бортовые отсеки, потребуется уменьшить крен при затоплении этих отсеков (т. е. увеличить непотопляемость), то при фиксированной длине и ширине отсека надо увеличить h . Это вызовет увеличение $\delta_T = BT$ и B (см. 7.6), что влияет на соотношения размеров судна и осложняет вопрос обеспечения водкости. Однако увеличение значений h и \bar{h} на большее значение оказывает на плавность качки.

7.2. Влияние волнения на бортовую качку судна

Судно на взволнованном море испытывает килевую и бортовую качку, а также совершает вертикальные перемещения. При определении его размеров и коэффициентов формы следует в максималь-

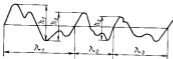


Рис. 7.1. Профиль волны при двукратном нерегулярном волнении.

ной степени учитывать влияние бортовой качки, так как в случае неудачных проектных решений она может оказать неблагоприятное воздействие на плавящееся судно. Учитывать килевую качку при проектировании судна чрезвычайно трудно, так как длина его волны зависит водкостью и требованиями к общему расположению.

Поверхность взволнованного моря в общем случае имеет трехмерный рельеф. Такие понятия, как высота и длина волн, носят условный характер. В задачах, связанных с проектированием су-

да, рассматривается двукратное нерегулярное волнение (длины $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ и высоты h_1, h_2, h_3 волн зависят во времени). При этом считается, что волны движутся в заданном (прямолинейном) направлении (рис. 7.1). Такая схема, несмотря на заведомую условность, все же позволяет получить приемлемые практические результаты [82].

Волны вызывают собственные и вынужденные колебания судна. Если волнение имеет регулярный характер и период волн далек от периода собственных колебаний судна, расположенного лагом к



Рис. 7.2. Отношение максимальной угловой кренности к углу эффективного волнового склона.

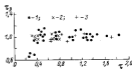


Рис. 7.3. Относительный период бортовой качки различных судов.
[— для треугольного; — для трапециевидного] H, B соответственно: 1 — прототип в килеватной модели судна АК-2 [83].

волне, то оно является с периодом волны. При совпадении периода волн регулярного волнения с периодом собственных колебаний судна возникает резонанс, и качка становится особенно резкой. В случае нерегулярного волнения, когда периоды волн находятся в известных пределах, собственные колебания судна, вызванные влиянием отдельных волн, не затухают.

Когда при нерегулярном волнении на судно действуют волны с периодом, близким к периоду собственных колебаний судна, также возникает резонанс. Однако переменность периода волн несколько ослабляет его действие по сравнению с резонансом на регулярном волнении.

На рис. 7.2, заимствованном из [81], показаны коэффициенты динамичности, т. е. отношение максимальных углов крена судна β_m на волнении к углу эффективного волнового склона α , в функции отношения периода собственных колебаний судна, расположенного лагом к волне, τ к периоду волны τ_w . Пунктирная кривая соответствует нерегулярному волнению. Как следует из рисунка, удаление периода собственных колебаний судна от среднего периода волны нежелательно.

Таким образом, особое значение периода собственных колебаний судна заключается в том, что при весьма разнообразном волнении с ним связана наибольшая амплитуда бортовой качки судна. Это подтверждается данными испытаний [81].

Рассмотрев рис. 7.3, можно видеть, как мало отклонится период бортовой качки судна, расположенного лагом к волне, от периода его собственных поперечных колебаний даже при значительном изменении среднего периода волны.

Следует учитывать, что частота встречи судна с волной при движении судна под углом к основному направлению распространения волны зависит от этого угла и от скорости судна. Период встречи волны с судном в этом движении (рис. 7.4), так называемый кажущийся период, будет

$$\tau_0 = \frac{\tau_w}{1 + (v/a) \sin \psi}, \quad (7.6)$$

где τ_w — период волны; v — скорость судна, м/с; a — скорость волны, м/с.

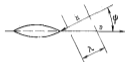


Рис. 7.4. Связь движения судна под углом к направлению волнения.

Для трюмной волны, обычно принимаемой в расчетах,

$$a = 1,25 \sqrt{L} = 1,56c.$$

Векторы скоростей v и a считаются направленными по направлению движения судна, волна идет в компас.

Этому направлению векторов v и a соответствует знак плюс в знаменателе выражения (7.6). Углы ψ отсчитываются, как указано на рисунке.

При курсе судна по отношению к основному направлению волны условие возникновения резонанса

$$\tau_0 = \tau. \quad (7.7)$$

Из (7.6) и (7.7) получаем

$$\frac{\tau_w}{\tau} = 1 + \frac{v}{a} \sin \psi.$$

Косинус угла, при котором возникает резонанс, будет

$$\sin \psi = \frac{a}{v} \left(\frac{\tau_w}{\tau} - 1 \right). \quad (7.8)$$

Из формулы (7.8) следует:

при $\tau > \tau_w$ резонанс может возникнуть только при попутной волне ($90^\circ < \psi < 180^\circ$), и чем больше период собственных колебаний судна, тем ближе к ДП направление волны, вызывающей резонанс.

при $\tau < \tau_w$ резонанс возникает только при встречной волне ($0^\circ < \psi < 90^\circ$).

Поскольку верхний предел длины волны ограничен (волны длиной 200 м, имеющие $\tau_w = 11,3$ с, редко), можно считать, что большие периоды собственных колебаний судна будут способствовать устранению резонанса. Нижний предел длины волны не ограничен. Поэтому, чем меньше период собственных колебаний судна, тем больше вероятность возникновения резонанса как на встречном, так, до известной степени, и на попутном волнении.

Таким образом, для ускорения качки необходимо стремиться проектировать суда, имеющие возможно большие периоды собственных поперечных колебаний.

При рассмотрении вопроса о неблагоприятных периодах волн и углах встречи судна с ними надо иметь в виду, что волны, направление которых близко к ДП, не могут вызвать резонансной бортовой качки, поскольку проекция возмущающих сил на плоскость поперечного сечения мала. Также не могут представлять опасности очень короткие волны, поскольку они несут малую энергию. Этим, во-первых, объясняется то, что суда с малым τ (волна λ с), плавающие в багсовых с ограниченным волнением ($\lambda = 40 \div 80$ м, $\tau_w = 5 \div 7$ с), ведут себя на волнении удовлетворительно.

Известно, что большие и широкие суда имеют большие τ . Так, для больших пассажирских судов τ достигает 30 с. Однако такие периоды собственных колебаний характерны для крупных судов старой постройки. На остойчивость и непотопляемость их не обращалось большого внимания. Повышение требований к остойчивости судов в современном состоянии, а также их аварийной остойчивости привело к тому, что верхний предел τ уменьшился теперь до 20 с.

Тенденция к увеличению размеров судов всех назначений, в том числе их ширины, приводит к увеличению нижнего предела τ .

Надо отметить, что увеличение скорости у современных судов уменьшает отношение v/a в формуле (7.8), а следовательно, расширяет область возможного появления резонанса на попутном волнении.

7.3. Связь периода собственных поперечных колебаний судна с его размерами и метацентрической высотой

Учитывая влияние периода собственных поперечных колебаний судна τ на плавность бортовой качки, следует установить связь этого периода с размерами судна. Также необходимо связать τ с b и \bar{h} . Основой для этого служит известная формула для определения периода собственных поперечных колебаний судна [8]:

$$\tau = 2\pi \sqrt{\frac{I + \Delta J}{D \bar{h}}} = 2\pi \sqrt{\frac{I + \Delta J}{\rho g \bar{h}}}. \quad (7.9)$$

где I — момент инерции массы судна относительно продольной центральной оси; ΔI — момент инерции присоединенной массы воды; h — начальная поперечная метацентрическая высота; D' — водоизмещение в единицах веса (МН); D — водоизмещение в единицах массы (т); g — ускорение свободного падения.

В формуле (7.9) значение I зависит от главных размеров судна. Если судно заменить прямоугольным параллелепипедом равной массы, которая распределена равномерно по его поперечному сечению в виде прямоугольника высотой H и шириной B , то

$$I = D \frac{B^2 + H^2}{12}. \quad (7.10)$$

Приближенные формулы для определения I , предложенные разными авторами, имеют вид

$$I = D \frac{aB^2 + bH^2}{12}.$$

В формуле Ю. А. Шиманского $a = 1,05$ ($\pi^2/6$); $b = 1$. В формуле Дуэра $a = 1$; $b = (2k_c)^2$, где $k_c = z_c/H$ — относительное возмещение ЦТ судна над основной линией. Таким образом, обе формулы близки к выражению (7.10), особенно если учесть, что отношение a^2/b , как правило, близко к единице (см. 6.7).

Отметим, что во формуле Дуэра можно получить большие значения I , чем по формуле Шиманского, поскольку k_c иногда значительно превышает 0,5 (см. 7.6).

Предположения о распределении массы судна по его поперечному сечению, которые легли в основу этих формул, являются не совсем точными, поэтому для предварительной оценки I может быть принята и более простая формула (7.10).

Величина $b_H = B/H$ (см. 7.6 и формулу (7.36)) близка к двум, что отмечал еще в XVIII в. Дюбуа де Монто. По современным данным, для транспортных судов разных классов $b_H = B/H = 1,89 \pm 0,25$. Для других морских судов это отношение близко к двум. Подставив в формулу (7.10) среднюю величину 1,89, получим

$$I = D \frac{B^2}{12} \left(1 + \frac{1}{b_H^2} \right) = DB^2 \frac{1,29}{12}.$$

По [81] $\Delta I = 0,25 I$.

Таким образом,

$$\tau_0 = 2\pi \frac{a}{\sqrt{\Delta}} \sqrt{\frac{1,29 \cdot 1,25}{12 \cdot 9,81}} = 0,73 \frac{B}{\sqrt{K}}. \quad (7.11)$$

Формула (7.11) позволяет оценить период собственных поперечных колебаний судна и зависимость от его ширины и начальной метацентрической высоты. Однако коэффициент при B/\sqrt{K} , равный 0,73, установленный в результате ряда догаданий, может принимать и другие значения. Поэтому зависимость (7.11) записывается так:

$$\tau = c(B/\sqrt{K}). \quad (7.12)$$

У. Ховард, предложивший эту формулу, указывал, что средние значения c для боевых кораблей (фрегатов, крейсеров, миноносцев) конца XIX в. колебались от 0,72 до 0,80.

Архитектурно-конструктивный тип судна и состояние его наружки влияют на величину c . Ховард приводит данные для стальных военных кораблей со вспомогательными корпусами возмущения, для которых c достигает единицы и даже несколько превышает ее, что может быть объяснено значительным влиянием рангоута на момент инерции массы судна. Он же отмечает, что для незабортных минаторов без надстроек и почти без рангоута значение уменьшается до 0,6. Изменение этого коэффициента при изменении наружки, например у современных нефтерудозвон, по данным Ж. Желькова 1451, составляет $c = 0,74 \pm 0,02$ при перевозке нефти; $c = 0,52 \pm 0,02$ — при перевозке руды; $c = 0,77 \pm 0,03$ —



Рис. 7.5. Схема к расчету момента инерции забортника.

при балластном перевозке. Исключительно малое значение c при нагрузке судна рудой объясняется тем, что ее принимают в средней трети, лежащей у ДП, в то время как нефть и балласт — в бортовых шпангоутах. Это приводит к значительному изменению момента инерции.

Рассмотрим вопрос об определении c для котловарков, чтобы предельно влиять архитектурно-конструктивного типа судна на эту величину.

Приближенная формула для центрального момента инерции массы котловарка относительно продольной оси может быть записана так (рис. 7.5):

$$I = D \frac{B^3}{12} \left[3 + \frac{B_c}{B} \left[\frac{B_c}{B} \left(2 + \frac{H^2}{B_c^2} \right) - 6 \right] \right],$$

где B — полная ширина котловарка; B_c — ширина каждого корпуса.

Следует тем же путем, который применен нас от формулы (7.10) к формуле (7.12), получить

$$\tau = a \sqrt{\frac{1,25 \left[3 + \left(\frac{B_c}{B} \right)^2 \left(2 + \frac{H^2}{B_c^2} \right) - 6 \frac{B_c}{B} \right]}{3 \cdot 9,81}} \times \frac{B}{\sqrt{\Delta}}.$$

Таким образом, в данном случае

$$c = \pi \sqrt{\frac{1,25 \left[3 + \left(\frac{B_0}{B} \right)^2 \right] \left(2 + \frac{H^2}{B^2} \right) - 6 \frac{B_0}{B}}{3,9,81}} = 0,65 \sqrt{3 + \left(\frac{B_0}{B} \right)^2 \left(2 + \frac{H^2}{B^2} \right) - 6 \frac{B_0}{B}}$$

Имея расстояние между корпусами, получаем

B_0/B	1/3	1/4	1/5
c	0,83	0,88	0,92

Из сказанного можно сделать вывод, что архитектурно-конструктивный тип и нагрузка судна оказывают существенное влияние на величину c в формуле (7.12).

При необходимости уточнения с величина τ легко находится при опытным определении остойчивости судна. Для этого судно раскачивают перебежными командами с борта на борт. Движение команды синхронизируется с качанием судна, и углы крена быстро нарастают. Пересеты c для разных состояний нагрузки в этом случае восходящие и базируются на исправлении I и, следовательно, τ , полученного из опыта.

Для большинства современных судов $c = 0,73 \pm 0,08$.

Величину c можно принять по прототипу, в случае близости его к проекту по распределению нагрузки и архитектурно-конструктивному типу.

Формула (7.12) записывается также в виде

$$\tau = c \sqrt{B \bar{K}}, \quad (7.13)$$

откуда отчетливо видна зависимость τ от B и \bar{K} .

Из графика (рис. 7.6), построенного по этой формуле при $c = 0,73$, видно, что увеличение ширины судна позволяет назначать большую величину \bar{K} , т. е. увеличивать остойчивость судна, не влияя на плавность качки. Это следует и из преобразованной выражения (7.13).

Если считать с основной характеристикой плавности качки, то очевидно преимущество широких судов. Увеличение τ за счет увеличения \bar{K} приводит к снижению остойчивости, что неприемлемо для малых судов.

Если считать минимально приемлемыми с точки зрения остойчивости и плавности качки величину $\bar{K} = 0,035$ [65] и $\tau = 12$ с, то по графику рис. 7.6 можно определить область комбинаций \bar{K} и B , которые могут приниматься при проектировании.

На рис. 7.6 занесены результаты определения \bar{K} по преобразованной формуле Нидергера [65] для судов, имеющих $B \geq 15$ м:

$$\bar{K} = 0,05 - \frac{0,020}{B^2}. \quad (7.14)$$

Второй член правой части этой формулы быстро убывает и при $B = 20$ можно принять $\bar{K} = 0,06$.

При $B = 15$ м (низкий крен) $\bar{K} = 0,048$, при $B = 17,5$ м $\bar{K} = 0,056$. Для этих значений \bar{K} при $c = 0,73$ по формуле (7.13) получаем $\tau = 13,1 \pm 0,2$.

Таким образом, для судов, имеющих $B = 15 \pm 20$ м, значение τ можно не вычислять по указанной формуле, а принять примерно равным 13 с.

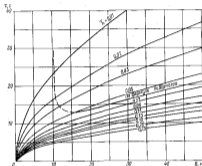


Рис. 7.6. Зависимость периода собственных колебаний судна от ширины и относительной метацентрической высоты.

В ряде случаев из-за ограничений, обусловленных особенностями внутренних водных путей (размеры шлюзов, глубина судового хода) и акваторий портов (затраченная осадка), приходится создавать суда с неблагоприятными относительно плавности качки размерами. В результате этого получаются большие значения \bar{K} , например для морских танкеров ($\bar{K} = 0,17$) и особенно для судов мелководного плавания ($\bar{K} = 0,24$). Заметим, что период собственных колебаний для последних судов уменьшается иногда до 5 с.

Так как для обеспечения остойчивости малых судов ($B \leq 30$ м) в основном vanno предотвратить крен от действия ветра (а не от затопления бортовых отсеков или пережатия грузов), то для них используется в расчетах абсолютная метацентрическая высота (см. 7.1).

Ряд авторов [65] рекомендует принимать в качестве основной характеристики начальной остойчивости даже для более широких судов ($10 \text{ м} < B < 15 \text{ м}$) абсолютную метацентрическую высоту.

Существующие успокоители качки значительно снижают амплитуду колебаний судов, особенно в области значений τ , близких к резонансу. В них, как следует из сказанного выше, в основном плавятся сравнительно малые суда. В то же время установка на них успокоителей усложняется в связи с ограниченными по нагрузке и мощности. Кроме того, успокоители качки имеют высокую стоимость.

Отрицательные последствия установки успокоителей, перечисленные выше, уменьшаются, когда дело касается больших судов, например, если при благоприятной плавности качки желательнее еще повысить эту плавность, например с целью повышения комфортабельности или создания устойчивой платформы для специальной аппаратуры.

7.4. Оценка плавности бортовой качки по максимальным ускорениям

Никогда плавность качки оценивают по величине максимальных ускорений в районе борта судна.

При возникновении резонанса, как уже отмечалось, судно совершает максимальные по амплитуде колебания с периодом, близким к периоду собственных колебаний τ . При таком периоде колебаний

угол крена

$$\theta = \theta_{\max} \sin \frac{2\pi}{\tau} t;$$

угловая скорость качки

$$\dot{\theta} = \theta_{\max} \frac{2\pi}{\tau} \cos \frac{2\pi}{\tau} t;$$

угловое ускорение качки

$$\ddot{\theta} = -\theta_{\max} \frac{4\pi^2}{\tau^2} \sin \frac{2\pi}{\tau} t;$$

максимальная абсолютная величина углового ускорения

$$|\ddot{\theta}|_{\max} = \theta_{\max} \frac{4\pi^2}{\tau^2}. \quad (7.15)$$

Таким образом, эта величина обратно пропорциональна τ^2 . Учитывая формулу (7.13), получаем

$$|\ddot{\theta}|_{\max} = \theta_{\max} \frac{4\pi^2}{c^2} \frac{\bar{k}}{\delta}. \quad (7.16)$$

Если условно считать, что ускорения вызваны только бортовой качкой и наибольшее опасное место, где действуют линейные горизонтальные ускорения, равно $B/2$, то их абсолютная величина при $c = 0,73$ будет

$$\ddot{z} = \bar{\theta} \frac{B}{2} = \theta_{\max} \frac{2\pi^2}{c^2} \bar{k} = 37\theta_{\max} \bar{k}. \quad (7.17)$$

При $\theta_{\max} = \text{const}$ увеличение \bar{k} ведет к увеличению \ddot{z} , что может вызвать перегрузки, действующие по время качки на приборы,

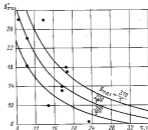


Рис. 7.7. Связь между максимальной амплитудой бортовой качки θ_{\max} и периодом собственных колебаний судна.

команды и пассажиров, находящихся в районе борта судна, в результате чего возможны выходы приборов из строя и заболевания людей морской болезнью.

Надо отметить, что влияние \bar{k} на \ddot{z} будет сильнее, чем это следует из формулы (7.17), так как с увеличением \bar{k} возрастает и θ_{\max} . Это видно из рис. 7.7, где представлены кривые зависимости θ_{\max} от τ для нескольких судов [81].

Принимая за критерий плавности качки максимальные вертикальные ускорения у борта судна (обычно считают $z = 0,1 \text{ g}$), мы должны учесть следующие:

у больших судов при прочих равных условиях θ_{\max} будет меньше, чем у малых, и, следовательно, меньше \ddot{z} ;

у больших грузовых судов, таких как крупнотоннажные танкеры и суда для массовых грузов, вертикальные линейные ускоре-

ния у борта не особо нажима, так как в этом районе на этих судах не размещаются механизмы и жилые помещения.

Считая \bar{h} основной величиной, от которой зависит \bar{z} , необходимо, как следует из диаграммы (рис. 7.6), увеличивать \bar{z} с ростом B .

Однако, учитывая другие упомянутые выше факторы, можно считать, что для широких судов возможно увеличение \bar{h} , особенно если это требуется по соображениям остойчивости и непотопляемости. Для них можно использовать приведенную величину \bar{z} , с авторским способом и угловое ускорения при бортовой качке.

7.5. Рекомендации по назначению величин \bar{h} и \bar{z} , характеризующих начальную остойчивость судов

Учитывая, что начальная остойчивость связана с абсолютной или относительной метацентрической высотой, а через эти величины с периодом и амплитудой качки, можно сделать следующие выводы.

Для широких судов ($B > 10$ м) за основную характеристику начальной остойчивости следует принимать относительную метацентрическую высоту \bar{h} . При увеличении B рекомендуется повышать \bar{h} , однако не следует принимать $\bar{z} < 12$ с. Для очень широких судов возможно даже некоторое повышение \bar{z} .

Для грузовых судов, размеры которых не ограничены навигационными условиями и особенностями водных путей, можно принимать $\bar{h} = 0,03 + 0,05$. Для больших судов \bar{h} увеличивают до 0,10 и даже до несколько больших величин, если судно должно иметь особо высокую живучесть.

Если расположение переборки на проектируемом судне, наложение из условий сохранения его живучести, может привести к большим кренам (при бортовых отбоях), то следует по схеме водопроницаемых отсеков проверить достаточность назначенной высоты по условиям аварийной остойчивости.

Наконец, для судов, размеры которых ограничены навигационными условиями, допускают очень большую величину \bar{z} , очевидно представляя, однако, несомненно такого компромисса.

Правила Регистра СССР требуют проверки остойчивости судов при больших углах крена. Однако практика проектирования и эксплуатации транспортных судов показала, что результаты такой проверки для судов шириной более 10 м подтверждают достаточность остойчивости в случае выбора ее характеристик в соответствии с предложенными выше рекомендациями. Проверка для этих судов остойчивости по Правилам Регистра СССР обычно носит формальный характер.

Для судов с $B < 10$ м проверка остойчивости по Правилам Регистра СССР может привести к необходимости изменения их размеров и принятой метацентрической высоты \bar{h} . При выборе \bar{h} и \bar{z} , особенно для судов с $B > 10$ м, может быть использован рис. 7.6.

Необходимо только учесть, что кривые построены по формуле (7.13) с постоянным коэффициентом $c = 0,73$. В то же время этот коэффициент может колебаться (см. формулу (7.13)). Поэтому при несоблюдении распределения масс по поперечному сечению судна следует вести расчеты непосредственно по формуле (7.9).

7.6. Принципы составления уравнения остойчивости.

Уравнение остойчивости по \bar{h} . Определены δ_T и связь его с другими величинами

В 7.1—7.5 было выяснено влияние метацентрической высоты в двух формах (абсолютной \bar{h} и относительной \bar{h}) на обеспечение достаточной остойчивости в умеренной качке судна.

Для учета требуемой метацентрической высоты при проектировании необходимо установить зависимость ее значения (абсолютного \bar{h} или относительного \bar{h}) от главных размеров и коэффици-

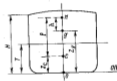


Рис. 7.8. Положение осевых точек, связанных с определением начальной остойчивости.

ентов полноты судна. Для этого нужно составить и решить уравнение остойчивости. Это уравнение может быть составлено в двух формах, в зависимости от того, что будет принято за основу: абсолютная или относительная метацентрическая высота.

Из рис. 7.8 видно, что абсолютная метацентрическая высота

$$\bar{h} = \overline{MG} = \overline{MC} + \overline{CG} = r + z_g - z_c \quad (7.18)$$

Входящие в (7.18) величины z_c и r могут быть выражены, согласно (6.30) и (6.37), так:

$$z_c = f_c(\alpha, \delta) T = k_c \frac{\alpha}{\alpha + \delta} T; \quad (7.19)$$

$$r = f_r(\alpha, \delta) \frac{B^2}{12T} = k_r \frac{\alpha^2}{8} \frac{\delta}{12T}. \quad (7.20)$$

Возвращение ЦТ судна над основной линией (ОЛ) может быть выражено в функции N : $z_c = k_z N$.

Подставляя (7.19), (7.20), (7.21) в (7.18), имеем

$$\bar{h} = f_0(\alpha, \delta) \frac{B^2}{12T} + f_1(\alpha, \delta) T - k_4 H. \quad (7.22)$$

Во второй половине XVIII в. Эйлер составил уравнение устойчивости приблизительно в этой форме [5] и по нему определял величину $b_T = B/T$, необходимую для обеспечения устойчивости.

В основе этого вида уравнения устойчивости лежит абсолютная метастабильная высота. Разделив обе части уравнения (7.22) на B , получим уравнение устойчивости по относительной метастабильной высоте

$$\bar{h} = \frac{h}{B} = f_0(\alpha, \delta) \frac{B}{12T} + f_1(\alpha, \delta) \frac{T}{B} - k_4 \frac{H}{B}. \quad (7.23)$$

Уравнение (7.22) удобно применять, когда рассматриваются различные комбинации размеров B , T и коэффициентов α и δ . В результате расчетов по (7.22) может быть получен ряд значений \bar{h} . Анализируя этот ряд, например, на основании измененного в 7.5, можно выбрать определенную комбинацию размеров и коэффициентов.

Уравнение в форме (7.23) дает возможность по заданной \bar{h} определить необходимую величину $b_T = B/T$.

Из уравнения (7.23) имеем

$$\bar{h} = \frac{f_0(\alpha, \delta)}{12} \frac{B}{T} + f_1(\alpha, \delta) \frac{T}{B} - k_4 \frac{H}{T} \frac{T}{B}$$

или

$$\bar{h} = \frac{f_0(\alpha, \delta)}{12} b_T + f_1(\alpha, \delta) \frac{1}{b_T} - k_4 b_T \frac{1}{b_T}. \quad (7.24)$$

Умножив обе части (7.24) на b_T , после простых преобразований получаем

$$b_T^2 - \frac{12\bar{h}}{f_0(\alpha, \delta)} b_T - \frac{12[f_1 b_T - f_1(\alpha, \delta)]}{f_0(\alpha, \delta)} = 0. \quad (7.25)$$

Решим это квадратное уравнение:

$$b_T = \frac{B}{T} = \frac{6\bar{h}}{f_0(\alpha, \delta)} \pm \sqrt{\frac{36\bar{h}^2}{f_0^2(\alpha, \delta)} + \frac{144[f_1 b_T - f_1(\alpha, \delta)]}{f_0(\alpha, \delta)}}$$

или

$$b_T = \frac{6}{f_0(\alpha, \delta)} \left[\bar{h} \pm \sqrt{\bar{h}^2 + \frac{f_0(\alpha, \delta)}{3} [k_4 b_T - f_1(\alpha, \delta)]} \right] \quad (7.26)$$

Подставляя в (7.26) величины $f_0(\alpha, \delta)$ и $f_1(\alpha, \delta)$, на основании (7.19) и (7.20) получаем

$$b_T = \frac{6\bar{h}}{k_2 \alpha^2} \left[\bar{h} \pm \sqrt{\bar{h}^2 + \frac{k_2}{3} \frac{\alpha^2}{\delta} (k_4 b_T - k_2 \frac{\alpha}{\alpha + \delta})} \right]. \quad (7.27)$$

Интересно определить величину b_T при $\bar{h} = 0$, что соответствует практическому минимуму начальной остойчивости, принимаемому до 1971 г. по Правилам Регистра СССР. (Этим Правилам допускается с 1971 г. принимать минимум начальной остойчивости, равный $\bar{h} = 5$ см.)

При $\bar{h} = 0$ или $\bar{h} = 0$ выражение (7.27) преобразуется к виду

$$b_T = \pm \frac{6}{k_2} \frac{\delta}{\alpha^2} \sqrt{\frac{k_2}{3} \frac{\alpha^2}{\delta} (k_4 b_T - k_2 \frac{\alpha}{\alpha + \delta})}. \quad (7.28)$$

В (7.28) знак «минус» не имеет смысла. Следовательно, он не имеет смысла и в (7.27).

Потому вместо (7.27) можно записать

$$b_T = \frac{6}{k_2} \frac{\delta}{\alpha^2} \left[\bar{h} + \sqrt{\bar{h}^2 + \frac{k_2}{3} \frac{\alpha^2}{\delta} (k_4 b_T - k_2 \frac{\alpha}{\alpha + \delta})} \right]. \quad (7.29)$$

Эта формула позволяет получить $b_T = B/T$, необходимое для обеспечения начальной остойчивости, оцениваемой по \bar{h} .

В ряде случаев рационально выражение (7.29) использовать в виде

$$b_T = \frac{6}{k_2} \frac{\delta}{\alpha^2} \bar{h} + \frac{6}{k_2} \frac{\delta}{\alpha^2} \sqrt{\bar{h}^2 + \frac{k_2}{3} \frac{\alpha^2}{\delta} (k_4 b_T - k_2 \frac{\alpha}{\alpha + \delta})}. \quad (7.30)$$

Для грубой оценки связи между b_T и \bar{h} можно упростить (7.30), приняв (см. 6.5, 6.7, 6.8) $k_2 = 1$; $k_4 = 1$; $\alpha^2 = \delta$.

В этом случае

$$b_T = 6\bar{h} + 6 \sqrt{\bar{h}^2 + \frac{1}{3} (k_4 b_T - k_2 \frac{\alpha}{\alpha + \delta})}. \quad (7.31)$$

Потому отметим, что величина

$$k_4 b_T - k_2 \frac{\alpha}{\alpha + \delta} = \frac{2\bar{h} - 2\delta}{T},$$

т. е. она равна отношению возмущения ЦТ над ЦВ к осадке.

Для абсолютного большинства морских судов и судов смешанного плавания $2 < b_T < 4$; $0,08 < \bar{h} < 0,24$.

Следовательно, величиной \bar{h}^2 во многих рассматриваемых задачах можно пренебречь вследствие ее малости, тем более, что для судов с особо большими \bar{h} они принимаются не из соображений устойчивости, и оценивать b_T по формуле

$$b_T = 6\bar{h} + 3,47 \sqrt{k_4 b_T - \frac{\alpha}{\alpha + \delta}}. \quad (7.32)$$

Формула (7.32) дает возможность оценить изменение δ_T в результате изменения \bar{K} и

$$\left(k_2 \delta_T - k_0 \frac{\alpha}{\alpha + \delta}\right) = \frac{k_2 - k_0}{T};$$

$$\begin{aligned} \Delta \delta_T &= \frac{\partial \delta_T}{\partial \bar{K}} \Delta \bar{K} + \frac{\partial \delta_T}{\partial \left(k_2 \delta_T - k_0 \frac{\alpha}{\alpha + \delta}\right)} \Delta \left(k_2 \delta_T - k_0 \frac{\alpha}{\alpha + \delta}\right) = \\ &= 6\bar{K} + \frac{1,74}{\sqrt{k_2 \delta_T - k_0 \frac{\alpha}{\alpha + \delta}}} \Delta \left(k_2 \delta_T - k_0 \frac{\alpha}{\alpha + \delta}\right). \end{aligned}$$

Для малых конечных приращений

$$\Delta \delta_T \approx 6\bar{K} + \frac{1,74}{\sqrt{k_2 \delta_T - k_0 \frac{\alpha}{\alpha + \delta}}} \Delta \left(k_2 \delta_T - k_0 \frac{\alpha}{\alpha + \delta}\right). \quad (7.33)$$

В том случае, когда $\left(k_2 \delta_T - k_0 \frac{\alpha}{\alpha + \delta}\right)$ не изменяется,

$$\Delta \delta_T \approx 6\bar{K}. \quad (7.34)$$

Формула (7.34) удобна для оценки влияния изменения \bar{K} на δ_T . Представляет интерес для учета влияния δ_T на \bar{K} и

$$\Delta \bar{K} \approx \Delta \delta_T / 6 \approx 0,167 \Delta \delta_T.$$

Из (7.33) можно получить и более общую формулу:

$$\Delta \bar{K} \approx 0,167 \Delta \delta_T - 0,289 \frac{\Delta \left(k_2 \delta_T - k_0 \frac{\alpha}{\alpha + \delta}\right)}{\sqrt{k_2 \delta_T - k_0 \frac{\alpha}{\alpha + \delta}}}. \quad (7.35)$$

Формула (7.35) также позволяет решить ряд вопросов, связанных с обеспечением остойчивости проектируемого судна.

Как видно, достаточно простым способом увеличения $\Delta \bar{K}$ является увеличение $\Delta \delta_T$, но не следует пренебрегать и вторым членом, который зависит, например, от материала рубок и надстроек. Так, при замене стали рубок и надстроек на легкий сплав величина $\Delta \left(k_2 \delta_T - k_0 \frac{\alpha}{\alpha + \delta}\right)$ будет отрицательной, в результате $\Delta \bar{K}$ повысится.

Из (7.35) видно, что неблагоприятное изменение одного из принимаемых может быть компенсировано изменением другого. Известно, что при переводе на сварку грузовых клеветных судов δ_T приходилось увеличивать на 0,04–0,07, что объясняется увеличением от носового возвышения ЦТ над ОЛ на величину $\Delta k_2 = 0,015 +$

– 0,025. Наибольшее облегчение при переводе на сварку достигалось устранением металлических угольников в двойном дне и стоечках на нем фундаментах, что повышало z_0 . Указанные величины могут быть получены по (7.35).

В тех случаях, когда нужно обеспечить требуемую грузоподъемность (грузовместимость), а одно из заданных размеров судна ограничено, например, заданной высотой, следует, так же как и при обеспечении начальной остойчивости, определить отклонение δ_T , независимо от приведенных выше соображений.

Так, для крупных танкеров и особенно для судов смешанного плавания часто ограничивают осадку, а ширину максимально увеличивают для создания нужной грузоподъемности. В результате для этих судов δ_T , а следовательно, \bar{K} и \bar{K} достигают больших значений. Определять δ_T по вышеприведенным формулам в данном случае не имеет смысла. Остается оценить остойчивость таких судов по формулам (7.22) и (7.23) при принятом δ_T .

Во всех приведенных выше расчетах фигурирует относительное возвышение ЦТ судна над его ОЛ $k_2 = z_0/H$. Назначать эту величину следует с большой осторожностью. Как показывает статистика, значения k_2 и z_0 колеблются очень сильно даже для судов одинакового назначения. Например, для водоизмещения проектного грузового судна шельтерачного типа, по данным Л. М. Ногина, $k_2 = 0,65 \pm 0,03$. Вообще же эта величина колеблется от 0,55 до 0,86. Поэтому желательно определять z_0 сразу после того, как будут вычислены водоизмещение судна и высота его борта. В этом случае целесообразно использовать ведомость нагрузки протопила. Когда в расчеты судна по высоте не вносятся изменения, при пересчете нагрузки с протопила против соответствующего веса (масса) записывается либо прежняя величина z_{00} (если ЦТ раздела нагрузки остался на прежней абсолютной высоте), либо $z_{01} = z_{00}(H_1/H)$ (если аппликата ЦТ нагрузки растет пропорционально H).

Например, при изменении H значение z_{00} остается без изменений, когда борт повышается, а z_0 остается на месте. Центр тяжести грузового устройства, расположенного на верхней палубе и выходящего за пределы нагрузки или его части, повышается пропорционально H .

Ниже приводится форма таблицы (табл. 7.1), во которой выполняются такого рода вычисления.

Рассмотрение (7.26) и его модификаций (7.27), (7.28), (7.29) показывает, что при заданном \bar{K} значение δ_T довольно жестко определяет начальную остойчивость судна. Поэтому очень часто, приняв при определении главных размеров судна конкретную величину δ_T , считают, что этим обеспечена остойчивость судна. Назначив δ_T по протопилу, следует проверить, не изменится ли проект по k_2 или \bar{K} от протопила, по которому принято δ_T .

Если необходимо изменить вместимость и \bar{K} , или остойчивость и \bar{K} , то следует соответственно изменить δ_T .

Таблица 7.1

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ ПОЛОЖЕНИЯ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ
ПРОЕКТИРУЕМОГО СУДНА ПО ВЫСОТЕ

№г раз- ряда	Наименование	ρ_{10}	τ_{10}	$\rho_{10}^2 \tau_{10}$	ρ_{11}	τ_{11}	$\rho_{11}^2 \tau_{11}^2$
1	Корпус						
2	Системы						
...						
...						
	Взаимодействие по- рявого судна	$D_{порв}$	$\tau_{порв}$	$M_{порв}$	$D_{порв}$	$\tau_{порв}$	$M_{порв}$
14	Экипаж и гр.						
15	Груз перевозимый						
16	Запас топлива						
17	Перевозимый жид- кий груз						
18	Жидкий балласт						
	Делает						
	Полное значение	D_0	τ_{00}	M_0	D_1	τ_{01}	M_1

* В зависимости от того, какая часть груза и в каком объеме выделит поделке судна ЦТ, часть могут фигурировать разряды, Грузов, топлив и других перевозимых грузов.

Оценка изменения δ_T может быть проведена по формулам данного параграфа.

Изменение δ_T в пределах от двух до четырех происходит в значительной мере вследствие изменения k_g , которое меняется от минимальных величин, свойственных сухогрузным судам с минимальным надводным бортом, до максимальных — для пассажирских судов с авиационной, имеющей максимальную вместимость и большое значение k_g .

Интересным фактом является малая колеблемость величины $\delta_T = B/H$. В XVIII в. ее считали близкой к двум. Статистические исследования показали, что для современных транспортных судов $\delta_T = 1,89 \pm 0,25$.

«Важная» устойчивость δ_{11} может быть объяснена из рассмотрения уравнения устойчивости (7.23).

Из этого уравнения можно получить

$$\delta_{11} = \frac{B}{H} = \frac{k_g}{I_0(\alpha, \delta) \frac{\delta_T}{12} + I_0(\alpha, \delta) \frac{1}{\delta_T} - k} \quad (7.36)$$

Сумма двух первых членов знаменателя образует функцию $f_{10}(\delta_T)$ от δ_T , причем значение δ_T на наименьшей этой функции проинтегрировано для обеих ее членов.

Экстремум этой функции определяется из выражения

$$\frac{d f_{10}(\delta_T)}{d \delta_T} = \frac{I_0(\alpha, \delta)}{12} - \frac{I_0(\alpha, \delta)}{k \delta_T^2} = 0.$$

Вторая производная $f_{10}(\delta_T)$ по δ_T показывает, что в данном случае экстремум является минимумом.

Отсюда

$$(\delta_T)_{\min} = \sqrt{12 \frac{I_0(\alpha, \delta)}{I_0(\alpha, \delta)}} = 3,47 \sqrt{\frac{k_g}{k_0} \frac{\alpha}{\alpha + \delta} \frac{\delta}{\alpha^2}}$$

Беря значения $I_0(\alpha, \delta)$ и $I_0(\alpha, \delta)$ из (6.31) и (6.39), учитывая, что $\alpha/\delta \approx 1$ и $k_0/k_g \approx 1$, что в среднем $\alpha/(\alpha + \delta) \approx 0,55$, получаем $(\delta_T)_{\min} = 2,6$. Найдем

$$\text{при } \delta_T = 2,2 \quad f_{10}(\delta_T) = 0,179 + 0,255 = 0,434;$$

$$\text{при } \delta_T = 2,4 \quad f_{10}(\delta_T) = 0,200 + 0,233 = 0,433;$$

$$\text{при } \delta_T = 2,5 \quad f_{10}(\delta_T) = 0,216 + 0,216 = 0,432;$$

$$\text{при } \delta_T = 2,8 \quad f_{10}(\delta_T) = 0,233 + 0,200 = 0,433;$$

$$\text{при } \delta_T = 3,0 \quad f_{10}(\delta_T) = 0,250 + 0,186 = 0,436.$$

Очевидно, что при $\delta_T = 2,2 \div 3,0$ и постоянных величинах k и k_g отношение $f_{10}(\delta_T)$ остается практически постоянным. Для широких судов это отношение несколько повышается, достигая при $\delta_T = 4,0$ величины $f_{10}(\delta_T) = 0,300 + 0,139 = 0,469$.

Для более широких судов допустимых большие величины k , однако можно считать, что и для этих судов $f_{10}(\delta_T)$ будет не очень отличаться от δ_T для судов с меньшими значениями δ_T .

7.7. Уравнение устойчивости в дифференциальной форме. Изменение положения метацентра по высоте с изменением размерений и коэффициентов полноты

Формулы (7.18) и (7.22) позволяют вынести связь между положением метацентра и величинами B , T , α и δ .

Формулу (7.18) можно записать в виде (см. разд. 7.6)

$$z_m = \overline{OM} = \rho + z_0 = I_0(\alpha, \delta) \frac{B^2}{12T} + I_0(\alpha, \delta) T. \quad (7.37)$$

Выражение в левой части уравнения (7.37) определяет z_m — координату метацентра над основной линией. Дифференцируем (7.37) и перейдем к конечным приращениям. Тогда

$$\Delta z_m = \Delta(\rho + z_0) = \Delta(\rho + z_0) = \frac{\partial \rho}{\partial B} \Delta B + \frac{\partial \rho}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial z_0}{\partial T} \Delta T + \\ + \frac{\partial \rho}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial \rho}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial z_0}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial z_0}{\partial \delta} \Delta \delta. \quad (7.38)$$

Принимаем в формуле (7.37) f_p и f_c по формулам (7.19) и (7.20):

$$f_p(\alpha, \delta) = k_p \frac{\alpha^2}{\delta};$$

$$f_c(\alpha, \delta) = k_c \frac{\alpha}{\alpha + \delta}.$$

Тогда семь членов правой части уравнения (7.35) можно переписать как

$$\frac{\partial p}{\partial \Delta} \Delta B = \frac{k_p}{6} \frac{\alpha^2}{\delta} \frac{\partial}{\partial \Gamma} \Delta B;$$

$$\frac{\partial p}{\partial T} \Delta T = - \frac{k_p}{12} \frac{\alpha^2}{\delta} \left(\frac{\partial}{\partial \Gamma} \right)^2 \Delta T;$$

$$\frac{\partial c_p}{\partial T} \Delta T = k_c \frac{\alpha}{\alpha + \delta} \Delta T;$$

$$\frac{\partial p}{\partial \alpha} \Delta \alpha = \frac{k_p}{6} \frac{\alpha}{\delta} \frac{\partial^2}{\partial \Gamma} \Delta \alpha;$$

$$\frac{\partial p}{\partial \delta} \Delta \delta = - \frac{k_p}{12} \frac{\alpha^2}{\delta^2} \frac{\partial^2}{\partial \Gamma} \Delta \delta;$$

$$\frac{\partial c}{\partial \alpha} \Delta \alpha = k_c \frac{\alpha \delta}{(\alpha + \delta)^2} T \Delta \alpha = k_c \frac{\alpha \delta T}{\alpha^2 + 2\alpha\delta + \delta^2} \frac{\Delta \alpha}{\alpha} = k_c \frac{T}{4} \frac{\Delta \alpha}{\alpha};$$

$$\frac{\partial c}{\partial \delta} \Delta \delta = - k_c \frac{\alpha}{(\alpha + \delta)^2} T \Delta \delta = - k_c \frac{\alpha \delta}{\alpha^2 + 2\alpha\delta + \delta^2} \frac{\Delta \delta}{\delta} = - k_c \frac{T}{4} \frac{\Delta \delta}{\delta}.$$

Преобразование двух последних формул основано на статистической зависимости $\alpha \delta + \delta/\alpha \approx 2$.

Приведенные семь выражений и общее выражение (7.38) дают возможность установить влияние изменений ширины, осадки и двух коэффициентов полноты на возмущение метacentра над ОЛ.

Учитывать эти изменения необходимо в ряде проектных задач, в частности, когда в процессе проектирования приходится изменять остойчивость. Так, иногда при оставлении более или менее детальной таблицы нагрузок возмущение метacentра над ОЛ ($\delta + z_p$) оказывается меньше, чем первоначально предполагали.

Строго говоря, следовало бы при рассмотрении изменений ΔB , ΔT и $\Delta \delta$ учитывать и изменения нагрузки, т. е. совместно решать уравнение (7.38) и следующее уравнение, получающееся из (4.14) при отсутствии изменения параметров и независимых масс:

$$\left[\frac{D}{\delta} - \frac{\partial P_1(D)}{\partial \delta} \right] \Delta \delta + \left[\frac{D}{L} - \frac{\partial P_1(D)}{\partial L} \right] \Delta L + \left[\frac{D}{\delta} - \frac{\partial P_1(D)}{\partial \delta} \right] \Delta B + \left[\frac{D}{T} - \frac{\partial P_1(D)}{\partial T} \right] \Delta T = 0.$$

Обычно членами, учитывающими нагрузку $P_1(D)$, здесь пренебрегают, полагая, что неточность от этого пренебрежения невелика, и считают лишь с условием постоянства плавучести, что дает:

$$\frac{D}{\delta} \Delta \delta + \frac{D}{L} \Delta L + \frac{D}{\delta} \Delta B + \frac{D}{T} \Delta T = 0$$

или

$$\frac{\Delta \delta}{\delta} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta B}{\delta} + \frac{\Delta T}{T} = 0. \quad (7.39)$$

Последнее выражение позволяет принимать для изменения остойчивости также комбинации изменений δ , L , B , T , которые обеспечивают неизменную плавучесть.

Ниже рассматриваются частные случаи, из которых наиболее практическое значение имеют случаи 1 и 2.

1. **Одновременное изменение B и T .** В этом случае увеличить B можно за счет уменьшения T . Из (7.39) при $\Delta L = 0$ и $\Delta \delta = 0$

$$\Delta T = - \Delta B \frac{T}{B}.$$

Принимаем в (7.38) $\Delta \alpha = 0$; $\Delta \delta = 0$. Считая $k_p \approx 1$, $\alpha^2/\delta \approx 1$, а также $k_c \approx 1$, имеем

$$\Delta z_m = \frac{\partial p}{\partial \delta} \Delta B + \frac{\partial p}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial c_p}{\partial T} \Delta T - \frac{k_p}{6} \frac{\alpha^2}{\delta} \frac{\partial}{\partial \Gamma} \Delta B - \frac{k_p}{12} \frac{\alpha^2}{\delta} \left(\frac{\partial}{\partial \Gamma} \right)^2 \Delta T + k_c \frac{\alpha}{\alpha + \delta} \Delta T = \frac{1}{6} \frac{\partial}{\partial \Gamma} \Delta B + \frac{1}{12} \frac{\partial}{\partial \Gamma} \Delta B - \frac{\alpha}{\alpha + \delta} \frac{T}{\delta} \Delta B = \left[\frac{\partial p}{4} - \frac{\alpha}{(\alpha + \delta) \delta T} \right] \Delta B$$

или

$$\Delta B = \frac{\Delta z_m}{\frac{\partial p}{4} - \frac{\alpha}{(\alpha + \delta) \delta T}}.$$

Если $\alpha/(\alpha + \delta) = 0,55$, то для изменения z_m на 1 см требуется для самых узких судов ($\delta_T = 2$) ширину изменить на 4 см, а для самых широких ($\delta_T = 4$) — на 1,2 см.

2. **Изменение α без изменения других величин.** В уравнении (7.38) $\Delta B = 0$; $\Delta T = 0$; $\Delta \delta = 0$. Тогда

$$\Delta z_m = \left[\frac{k_p}{6} \frac{\alpha}{\delta} \frac{\partial^2}{\partial \Gamma} + \frac{k_c}{4\alpha} T \right] \Delta \alpha = \left[\frac{k_p}{6} \frac{\alpha^2}{\delta} \delta_T + \frac{k_c}{4\delta_T} \right] \frac{\Delta \alpha}{\alpha} B.$$

Таким образом, в упрощенном виде

$$\Delta z_m = \left(\frac{b_T}{6} + \frac{1}{4b_T} \right) \frac{\Delta \alpha}{\alpha} B.$$

Крайние значения этой величины при $b_T = 2$ $b_T/6 + 1/4b_T = 0,46$; при $b_T = 4$ $b_T/6 + 1/4b_T = 0,73$.

Рассмотрим изменение Δz_m только за счет δ при неизменном положении ЦТ ($\Delta x_c = 0$), т.е.

$$\frac{\Delta z_m}{\alpha} = \Delta \delta = \left(\frac{b_T}{6} + \frac{1}{4b_T} \right) \frac{\Delta \delta}{\alpha}.$$

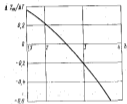


Рис. 7.9. Зависимость относительного возмущения метацентра от относительной ширины к осадке.

Отсюда

$$\frac{\Delta z_m}{\alpha} = \frac{B}{\frac{b_T}{6} + \frac{1}{4b_T}} = \frac{\bar{h}}{0,46 + 0,73} = (2,17 + 1,37) \Delta \delta.$$

Следовательно, для изменения \bar{h} на 0,01 (это значительное изменение) достаточно изменить $\Delta z_m/\alpha$ всего на $0,014 \div 0,022$.

3. Изменение B (остальные величины, входящие в (7.38), постоянны) за счет L . Из уравнения (7.39) следует $\Delta L = -\Delta \delta (L/\delta)$.

При таком изменении ΔL можно изменить остойчивость за счет B , не меняя плавучести.

Для этого случая в (7.38) при $\Delta T = 0$; $\Delta x = 0$; $\Delta \delta = 0$

$$\Delta z_m = \Delta(h + z_c) = \frac{\partial p}{\partial \delta} \Delta \delta = \frac{k_p}{6} \frac{\alpha^2}{\delta} \frac{B}{T} \Delta B.$$

Считая $k_p = 1$; $\alpha^2/\delta = 1$, имеем $\Delta(h + z_c) = \frac{B}{T} \frac{\Delta B}{6}$ или $\Delta B = (6/b_T) \Delta(h + z_c)$.

Таким образом, для изменения при заданных условиях возмущения метацентра над ОЛ ($h + z_c$) на 1 см нужно изменить ΔB на $6/b_T$ см. Так как $2 < b_T < 4$, то для изменения z_m на 1 см ΔB (за счет ΔL) должно быть изменено на 3 см (для самых узких судов) или на 1,5 см (для самых широких).

4. Изменение T за счет L . Изменение T производится за счет L . Из уравнения (7.39) получаем $\Delta L = -\Delta T (L/T)$.

В этом случае в (7.38) $\Delta B = 0$; $\Delta x = 0$; $\Delta \delta = 0$. Тогда

$$\Delta z_m = \left(\frac{\partial p}{\partial T} + \frac{\partial z_c}{\partial T} \right) \Delta T = \left[-\frac{k_p}{12} \frac{\alpha^2}{\delta} \left(\frac{B}{T} \right)^2 + k_p \frac{\alpha}{\alpha + \delta} \right] \Delta T$$

или после некоторых упрощений, принятых выше, заменив $\alpha/(\alpha + \delta)$ средней величиной 0,55,

$$\frac{\Delta z_m}{\Delta T} = \left(0,55 - \frac{\alpha^2}{12} \right).$$

Правая часть изменится от $+0,22$ до $-0,78$, если b_T находится в пределах от двух до четырех.

При $\Delta B = 0$; $\Delta x = 0$; $\Delta \delta = 0$

$$b_T = \sqrt{12 \frac{\alpha}{\alpha + \delta}} = \sqrt{12 \cdot 0,55} = \sqrt{6,6} = 2,60 \frac{\Delta z_m}{\Delta T} = 0.$$

Таким образом, в данном случае узкие суда ($b_T < 2,60$) выигрывают в остойчивости от увеличения осадки, а широкие ($b_T > 2,60$) проигрывают (рис. 7.9).

5. Изменение δ за счет L . Изменяем δ за счет L . Из уравнения (7.39) $\Delta L = -\Delta \delta (L/\delta)$.

Изменяем остойчивость при постоянном значении плавучести:

$$\Delta z_m = \left(\frac{\partial p}{\partial \delta} + \frac{\partial z_c}{\partial \delta} \right) \Delta \delta = - \left[\frac{k_p}{12} \frac{\alpha^2}{\delta} \frac{B^2}{T} + \frac{k_p}{4} \frac{T}{\delta} \right] \Delta \delta = - \left[\frac{k_p}{12} \frac{\alpha^2}{\delta} b_T + \frac{k_p}{4b_T} \right] \frac{\Delta \delta}{\delta} B.$$

Упрощая уравнение аналогично предыдущему, получаем

$$\Delta z_m \approx - \left(\frac{b_T}{12} + \frac{1}{4b_T} \right) \frac{\Delta \delta}{\delta} B.$$

$$\text{При } b_T = 2 \quad \left(\frac{b_T}{12} + \frac{1}{4b_T} \right) = 0,29;$$

$$\text{при } b_T = 4 \quad \left(\frac{b_T}{12} + \frac{1}{4b_T} \right) = 0,60.$$

Если изменение z_m происходит за счет одной абсолютной метацентрической высоты h , то для увеличения \bar{h} на 0,01 ($\Delta \bar{h} = 0,01$)

требуется уменьшить $\Delta\delta/\delta$ на 0,025–0,035, т. е. увеличение δ отрицательно сказывается на остойчивости судна.

Выше рассмотрены частные случаи влияния изменения ряда величин на остойчивость. При необходимости могут быть проанализированы и другие случаи, например одновременное изменение B и δ .

Если имеются достаточно подробная ведомость нагрузки и надежные формулы, выражающие составляющие этой нагрузки через размеры и коэффициенты, то необходимо ввести в рассмотренную формулу (6.14) и учесть в формулах изменения остойчивости члены, выражающие изменения нагрузки $\frac{\partial P_i(B)}{\partial \delta}$ и т. д.

Наибольший практический интерес представляют случаи изменения B , а также α . Изменение последнего наиболее эффективно, но редко используется, что связывается с желанием преобразовать теоретический чертёж каким-либо способом, кроме аффинного.

Выше мы говорили об изменении $z_m = (\delta + z_0)$. Следует подчеркнуть, что такое изменение бывает необходимо практически в двух случаях: а) если желательно изменить величину δ ; б) если желательно сохранить прежнюю величину δ , а величина z_0 изменялась в процессе проектирования. При этом надо иметь в виду, что разобранные выше изменения легко осуществить, когда идет процесс проектирования и не начал еще выпуск рабочих чертежей.

Отсюда видно, как важно на ранних этапах проектирования составить хорошо обоснованные таблицы нагрузки и выяснить соответствующую ей величину z_m .

7.2. Обеспечение остойчивости при больших углах крена

Для судов длиной $L < 80$ м, следовательно, шириной $B = 10–12$ м опасность создает давление ветра на боковую поверхность. Для этих судов возможны случаи опрокидывания под действием ветра и волнения.

У судов, надводный борт которых не регламентируется Правилами надводного борта по Международной конвенции, например у военных кораблей, имеются обычно большие запасы плавучести и соответствующий им надводный борт. В результате в неблагоприятном состоянии они могут плавать в любых погодных условиях.

Тем не менее как для судов малой длины и ширины, так и для прочих судов после определения их главных размеров обязательно проверяется остойчивость на больших углах крена.

Для судов, на которые распространяется действие Правил Регистра СССР, т. е. для всех проектируемых гражданских водонеподъемных судов $L > 20$ м, предъявляются требования к величинам, характеризующим остойчивость судна на больших углах крена.

Как следует из этих правил, расчет остойчивости на больших углах крена следует выполнять общепринятыми в теории корабля

методами. Если расчет выполняется с помощью вычислительных машин, то методика расчета и программа вычислений должны быть одобрены Регистром.

Таким образом, для проверки остойчивости нужно по определенным в процессе проектирования размерам и коэффициентам иллюзии построить теоретический чертёж и рассчитать положение ЦТ судна по высоте для транспортных судов с полным грузом и полным запасом; с полным грузом и с 10 % запасом; без груза с полным запасом; без груза с 10 % запасом.

Для пассажирских судов, лесовозов, армоплатных судов число рассматриваемых случаев увеличивается. Кроме того, Регистр требует учитывать наличие свободных поверхностей в цистернах и трюмах, насыпных грузов, оборудования и т. д. Для буксиров учитывается влияние рыска троса на остойчивость.



Рис. 7.10. Схема к учету требований Регистра СССР по диаграмме Риза.

Иногда для последующего расчета остойчивости на больших углах крена строят диаграммы остойчивости по ограниченному числу характеристик судна, зная метацентрический радиус и положение ЦВ в прямом положении и при наклоне на 90° . Этот способ впервые был предложен В. Л. Поддольным. Работал в этой области Г. Е. Павленко, В. Г. Власов, А. В. Знаменский, Н. А. Заботкин, С. Н. Валговецкий, В. В. Савосин-Тих-Шанский, А. В. Самохвалов, Ю. Н. Семенов. Однако на практике применяется обычно расчет по теоретическому чертёжу, тем более что этого требуют Правила Регистра.

Диаграмма остойчивости (диаграмма Риза) строится с учетом влияния качки (рис. 7.10).

Для построения диаграммы статической остойчивости требуется, чтобы, во-первых, максимальное плечо остойчивости l_{max} было не менее величина, указанных ниже:

$l_{max}, м$	0,25	$\frac{(B-0,2L)}{100}$	0,30
$L, м$	80	80–105	105

Во-вторых, это максимальное плечо должно соответствовать углу крена $\theta \geq 30^\circ$. В-третьих, угол заката диаграммы $\theta \geq 60^\circ$. При этом критерий посылки $K = (M_c/M_{\theta}) \geq 1$, где M_c — макси-

мальный момент, выдерживаемый судном при динамическом крене с учетом бортовой кички; M_{σ} — ветровой кренящий момент.

Действие качки увеличивает опасность опрокидывания, так как кренящий момент M_{σ} увеличивается и для противодействия ему нужна большая работа восстанавливающего момента.

Ветровой кренящий момент принимается равным (см. формулу (7.4)): $M_{\sigma} = \rho_{\sigma} A_{\sigma} z_{\sigma}$.

Для судов пограничного плавания табличную величину удельного давления ветра А. В. Самозвалов выразил в тоннах силы на квадратный метр: $\rho_{\sigma} = 0,77 z_{\sigma}^2$, что соответствует [увеличение в килопаскалах на квадратный метр:

$$\rho_{\sigma} = 7,56 z_{\sigma}^2.$$

Для судов океанического плавания Правила Регистра допускают снижение этой величины.

Амплитуда качки круглобортного судна без скуловых килей нах брускового киле определяется, как $\theta = X_1 X_2 Y$, где X_1 — убывающая функция отношения $b_{\sigma} = B/T$; X_2 — возрастающая функция коэффициента общей полноты δ ; Y — возрастающая функция величины, обратно пропорциональной периоду собственных

бортовых колебаний судна, т. е. прямо пропорциональной $\sqrt{b/B}$.

Для судов $B > 12$ м с регламентированным надводным бортом и, следовательно, со значительным запасом плавучести расчет остойчивости на больших углах крена подтверждает их размеры, выбранные на основании начальной поперечной метацентрической высоты (абсолютной \bar{h} или относительной \bar{h}_0).

По Регистру захват диаграммы Рюда должен быть не менее 60° . В соответствии с этим требованием можно ограничить расчет остойчивости судна углом, равным 60° .

А. В. Самозвалов, исследовавший остойчивость современных судозорных судов, построил график, показывающий, при каких размерах их можно считать соответствующими Правилам Регистра [80].

Хотя практически для всех гражданских судов обязательен расчет по Правилам Регистра, но для большинства он является формальным, так как для них критерий погоды значительно превышает единицу. Это подтверждается данными статистики ИМО, из которых видно, что число случаев потери остойчивости, т. е. опрокидывания судов, резко уменьшается с ростом их размеров.

Только для малых, главным образом промысловых, судов этот расчет может дать результаты, не подтверждающие первоначально принятых размеров и в случае, если не учтены данные по надводному борту, высоте надстроек, рубок и метацентрической высоте бланых прогонцов.

В тех случаях, когда все же необходимо построение диаграммы Рюда до построения теоретического чертежа, наиболее рациональ-

ной является предложенная Ю. Н. Семеновым [16] формула для захват диаграммы Рюда:

$$I = \rho_{\sigma} \cos \theta - k_1 \rho_{\sigma} (\ln \cos \theta) \sin \theta + k_2 c_1 a_1 \sin \theta - (z_1 - z_2) \sin \theta, \quad (7.40)$$

где ρ_{σ} — ордината ЦВ; $\rho_{\sigma 90}$ — ордината ЦВ при $\theta = 90^\circ$; k_1 — коэффициент, зависящий от $b_M = B/H$; a_1 — коэффициент, равный 1,215; c — коэффициент, зависящий от θ ; a_2 — коэффициент, равный 0,465.

Коэффициент $k_1 = (1 \pm 0,08) b_M^2$.

При $20^\circ < \theta < 60^\circ$, или в радианах $0,35 < \theta < 1,05$, коэффициент $c = 0,333 + 2,17 \theta$ ($\theta = 0,75$);

при $60^\circ < \theta < 90^\circ$, или в радианах $1,05 < \theta < 1,57$, $c = 14,08 - 13,35 \theta$ ($2 = 0$).

ЗАПАС ПЛАВУЧЕСТИ И ВЫСОТА НАДВОДНОГО БОРТА. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НЕПОТОПЛЯЕМОСТИ

8.1. Постановка задачи

В процессе проектирования судна определяют его размеры и коэффициенты вплоть до такого объема, чтобы обеспечить необходимую грузоподъемность (грузоамплитудность), скорость, остойчивость, а также запас плавучести и определенный уровень непотопляемости. Существенную роль в обеспечении этих свойств судна играет высота надводного борта. Прежде всего рассматривают наименьшую его высоту $H_{\delta, \text{н}}$, измеренную по средней длине судна, затем высоту надводного борта в носу $H_{\delta, \text{н}}$ и корме $H_{\delta, \text{к}}$.

Полная высота борта по средней длине судна $H = H_{\delta, \text{н}} + T$, где T — осадка судна. Полная высота борта судна определяется, таким образом, осадкой T и величиной минимального надводного борта $H_{\delta, \text{н}}$.

Высота надводного борта $H_{\delta, \text{н}}$, а следовательно, и полная высота борта играют роль в обеспечении не только запаса плавучести и непотопляемости судна, но и маневренности и маневренности его открытых палуб, мостиков и в конечном счете безопасности передвижения по палубе судовой команды.

Непотопляемость судна при данном $H_{\delta, \text{н}}$ зависит также от расположения переборок судна, т. е. от его общего расположения, которое должно учитываться уже в самом начале проектирования.

8.2. Запас плавучести

А. Н. Крылов говорил, что «мерой запаса плавучести служат объем между действующей ватерлинией корабля и верхней из водонепроницаемых палуб, при этом предполагается, что наружный борт водонепроницаем. Далее он указывал, что «на высокобортовых судах при исправном надводном борте, люках и конюлах запас плавучести бывает разра водонепроницаемо, а иногда даже больше его, т. е. если на таком корабле задрать все люки на внешней палубе (расположенной на уровне грузовой ватерлинии), то можно затопить весь трюм — корабль погрузится почти по верхнюю палубу, но не утонет. Следовательно, непотопляемость обеспечивается запасом плавучести».

В подтверждение сказанного А. Н. Крылов приводит пример аварии одного из первых броненосных кораблей русского флота — броненосной батареи «Крестья», которая на перезде на Кронштадт в Ревель (Таллин) в 1885 г. получила течь и затонула бы, если бы не значительный запас плавучести, позволивший ей выбраться на берег в тот момент, когда высота воды в трюме по всей длине корабля достигала 1,85 м (при осадке в непогруженном состоянии 4,5 м).

Запас плавучести обеспечивается объемом (амплитудой) непроливаемого основного корпуса над ватерлинией, соответствующей данной нагрузке судна. Объем рассматривают запас плавучести, а следовательно, и объем между грузовой (конструктивной) ватерлинией и верхней непроницаемой водонепроницаемой палубой.

Таким образом, запас плавучести по (5.13)

$$W_{\text{пл}} = S(H - T)(1 + k_1),$$

где k_1 — коэффициент, учитывающий развал борта, седловатость и пошиб палубы.

Как известно, минимальный надводный борт судна $H_{\delta, \text{н}} = H - T$, а площадь ватерлинии $S = \alpha L B$, следовательно:

$$W_{\text{пл}} = \alpha L B H_{\delta, \text{н}} (1 + k_1),$$

а относительный запас плавучести*

$$\frac{W_{\text{пл}}}{V} = \frac{\alpha L B H_{\delta, \text{н}} (1 + k_1)}{62,87} = \frac{\alpha}{\delta} (1 + k_1) \frac{H_{\delta, \text{н}}}{T}. \quad (8.1)$$

Принимая по (5.27) среднюю величину $\alpha \approx \delta^{12}$, имеем

$$\frac{W_{\text{пл}}}{V} = \frac{1 + k_1}{\delta^{12}} \frac{H_{\delta, \text{н}}}{T}. \quad (8.2)$$

По этой формуле значение $W_{\text{пл}}/V$ будет максимальным при максимальном значении k_1 и минимальном значении δ , что соответствует быстрозатонуем (острым) судам с большим развалом бортов и развитыми надстройками, например пассажирскими лайнерам.

Принимая для этого случая близкие к предельным величинам $\delta = 0,45$, $k_1 = 0,28$, получаем $W_{\text{пл}}/V = 1,09 H_{\delta, \text{н}}/T$.

Значение $W_{\text{пл}}/V$ будет минимальным при минимальном значении k_1 и максимальном значении δ , что соответствует тилоидным полным судам с малым развалом бортов, малоразвитыми надстройками и без седловатости.

Принимая $\delta = 0,85$, $k_1 = 0$, имеем $W_{\text{пл}}/V = 1,09 H_{\delta, \text{н}}/T$. Таким образом, можно считать, что значения $W_{\text{пл}}/V$ находятся в пределах $(1 \div 2) (H_{\delta, \text{н}}/T)$.

Можно установить и зависимость относительного надводного борта от относительной плавучести:

$$\frac{H_{\delta, \text{н}}}{T} = \frac{\delta}{\alpha (1 + k_1)} \frac{W_{\text{пл}}}{V} = \frac{\delta^{12}}{1 + k_1} \frac{W_{\text{пл}}}{V}.$$

* Здесь опускается коэффициент конструктивной ватерлинии k_1 .

Следовательно, величина относительного минимального надводного борта колеблется от $H_0 \cdot T \approx W_{\text{в.12}}/V$ для валких тихоходных судов без развала борта и оседлости до $H_0 \cdot T \approx 0,5 W_{\text{в.12}}/V$ для острых быстроходных судов с развитыми надстройками, развалом борта и оседлостью.

Обеспечение наибольшей удельной грузоместности первой группы судов (см. Б.5), а также дифференцировки (устройство члена балластных цистерн на крупнотоннажных танкерах) способствуют повышению надводного борта и запаса плавучести.

Б.3. Влияние высоты надводного борта на мореходные свойства судна

Высота надводного борта вместе с начальной метасентрической высотой обеспечивают также остойчивость судна на больших углах крена. Плавное нарастание высоты борта от середины судна к оконечностям (оседлость палубы) положительно влияет на износостойкость, уменьшает заливаемость и забрызгиваемость судна при движении на морском волнении. Заливаемость и забрызгиваемость на ходу особенно зависят от высоты надводного борта у форштевня и на первой четверти длины судна в носовой оконечности. Поэтому при проектировании особое внимание нужно уделить следующим величинам:

а) наименьшей высоте надводного борта, обычно соответствующей середине длины судна $H_{0,5}$;

б) высоте надводного борта в носу $H_{0,в}$.

Высота надводного борта должна быть достаточной для обеспечения ряда мореходных качеств или, точнее говоря, свойств судна, о которых говорилось в начале параграфа, а также для обеспечения безопасности людей, работающих на открытой палубе судна или перекапавшихся на ней.

Говоря о заливаемости судна, следует иметь в виду не только поступление масс воды через нос на встречной волне, но поступление воды через борт при бортовой волне при наименьшей высоте надводного борта. Анализируя результаты попадания больших масс воды на палубу, приходится оценивать надежность люковых закрытий на открытой палубе, предохраняющих от затопления внутренних помещений судна.

Высоту минимального надводного борта следует назначать в зависимости от района плавания судна, так как вертикаль (среднестатистическая) сила ветра и волнения в разных районах плавания различна.

На грузовых судах наносит знак грузовой марки, определяющий минимально допустимую высоту надводного борта.

В настоящее время грузовой марку у нас в стране выдают в соответствии с Правилами Регистра СССР, основанными на требованиях Международной конвенции 1956 г. Правила Регистра СССР распространяются и на рыболовные суда, о которых не удалось

договориться в международном масштабе, и на суда ограниченного района плавания (для них высота надводного борта снижается по сравнению с судами неограниченного района плавания). Изданные Регистром СССР Правила о грузовой марке морских судов являются обобщением традиционного консультационного опыта. Учитывая погодные условия, эти правила назначают для судов, плавающих в Каспийском море, высоту надводного борта меньшую, чем для океанских судов. Краткий анализ этих правил, сделанный в следующих параграфах, позволяет судить о влиянии разных факторов на высоту надводного борта.

При решении конкретной задачи о назначении надводного борта при проектировании конкретного судна следует пользоваться этими правилами.

Б.4. Базисный надводный борт и стандартная оседлость палубы. Соответствующий запас плавучести

В основу Правил о грузовой марке положены таблицы так называемого базисного надводного борта морских судов. Базисный надводный борт — это минимальный надводный борт в середине расчетной длины судна L . Длину L измеряют в соответствии с правилами на уровне ватерлинии, соответствующей осадке, равной 0,85 наименьшей полной высоты борта, т. е. при $T = 0,85 H$. Длину L принимают либо равной 96 % длины судна по этой ватерлинии, либо равной длине при этой осадке от крайней промеха форштевня до оси баллера руля.

Указанные выше длину и осадку T берут за основу при расчете коэффициента общей полноты δ для судов, подпадающих под действие правил.

Определенные условием L и T банки с реальными величинами значительного числа судов, подпадающих под действие Правил о грузовой марке. Величина минимального базисного надводного борта относится к судам, имеющим условием $\delta = 0,68$; $L/H = 15$.

Все подпадающие под действие правила суда разделяются на две группы: А — наливные суда с небольшими отверстиями в палубе; В — все прочие суда, т. е. суда с большими люковыми отверстиями в палубе.

Вероятность затопления внутренних помещений, а следовательно, и потери запаса плавучести при заливании палубы у судов типа В больше, чем у судов типа А. Можно считать, что от типа люков и их закрытий зависит надежность обеспечения запаса плавучести.

В последнем судостроении работают над совершенствованием люковых закрытий судов, причисленных к категории В, как над одним из путей повышения этой надежности.

Величина базисного минимального надводного борта, указанная в этих таблицах, относится только к тем судам типа В, которые имеют плоские, закрытые ветроприемными при колеблется моря

крышками из стали или другого равнопрочного материала, снабженными прокладками и устройствами для задранивания» (формулы и рисунки прилагаются).

Для судов типа В, имеющих «люки, закрытые съёмными крышками, непрочностью которых при падении воды обеспечена брезентами и устройствами для их закрепления», т. е. для судов со старым типом закрытия люков, значение базисного надводного борта следует увеличивать в пределах от 50 до 358 мм.

Таким образом, ослабление конструктивной непрочности открытой палубы и уменьшение надёжности запаса плавучести компенсируется увеличением самой величины надводного борта.

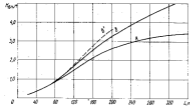


Рис. 8.1. Кривые базисного надводного борта: А, В — суда типа В; Б — суда типа В со старым устройством люков закрытия.

Надводный борт $H_{0,в}$, указанный в таблицах, соответствует плавлению в летнее время, в определенных районах и для в функции длины судна L . Кривые минимального базисного надводного борта показаны на рис. 8.1.

А. В. Савоказова составила следующие приближенные аналитические выражения для базисного надводного борта судов типа В: для всего диапазона изменений L : $H_{0,в} = 0,107 \cdot 10^{-8} L^8 - 0,924 \cdot 10^{-6} L^7 + 2,46 \cdot 10^{-4} L^6 - 0,52 \cdot 10^{-2} L + 0,16$;

для $60 \text{ м} < L < 230 \text{ м}$ $H_{0,в} = 1,97 \cdot 10^{-4} - 0,03$;

для $230 \text{ м} < L < 365 \text{ м}$ $H_{0,в} = 1,2 \cdot 10^{-2} L + 1,00$.

Для указанных таблиц

$$\frac{L}{H} = \frac{L}{H_{0,в} + T} = 15,$$

а, следовательно,

$$T = (L/15) - H_{0,в}. \quad (8.3)$$

Поэтому таблицы могут быть перестроены так, что надводный борт будет функцией осадки T и, таким образом, позволит рассчитать запас плавучести (без учета седловатости, погни и развала борта), т. е. при $K_в = 0$ по формуле (8.2) и при T по формуле (8.3):

$$\frac{W_{плв}}{V} = \frac{\alpha}{\delta} \frac{H_{0,в}}{T} \approx \frac{1}{\delta^{1,2}} \frac{H_{0,в}}{T} = \frac{1}{0,66^{1,2}} \frac{1}{(L/15H_{0,в}) - 1} = \frac{1,21}{(L/15H_{0,в}) - 1}. \quad (8.4)$$

Истинный запас плавучести судов, подпадающих под эти правила, несколько больше, чем по (8.4), так как в ней $K_в = 0$.

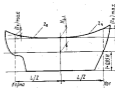


Рис. 8.2. Стандартная осадка судов по Правилам Регистра СССР.

В Правилах Регистра СССР предъявляются требования к созданию определенной седловатости палубы. Отсутствие седловатости должно компенсироваться повышением высоты минимального надводного борта. Коэффициент $K_в$ в формуле (8.2) учитывает по правилам люки объема, создаваемый седловатостью палубы надводного борта. Форма проекции бортовой линии на диаметральною плоскость задается квадратичными параболой с нулевой аппликатой при середине L (рис. 8.2).

Аппликаты параболы (м):

$$z_n = 0,2 \left(\frac{x}{L} \right)^2 \left(\frac{L}{3} + 10 \right); \quad (8.5)$$

$$z_k = 0,1 \left(\frac{x}{L} \right)^2 \left(\frac{L}{3} + 10 \right). \quad (8.6)$$

Таким образом, наибольшая крайняя аппликата в носу

$$|z_n|_{\max} = 0,05 \left(\frac{L}{3} + 10 \right),$$

а в корме

$$|z_k|_{\max} = 0,025 \left(\frac{L}{3} + 10 \right).$$

Объем, заключенный между верхней линией ($T + H_{\text{с.н.}}$) и палубой, имеющей седловатость, но не имеющей поперечной погиби, будет для носовой части

$$V_{\text{с.н.}} = \int_{x=0}^{x=L/2} z_{\text{с.н.}} 2y dx,$$

где y — ординаты упомянутой верхней линии.

Считая ее параболической, а борт прямостоящим, имеем (см. 6.9 и 8.1)

$$y = \frac{b}{2} \left[1 - \left(2 \frac{x}{L} \right)^2 \right] - \frac{b}{2} \left[1 - \left(2 \frac{x}{L} \right)^{2(1-\alpha)} \right];$$

$$V_{\text{с.н.}} = \int_{x=0}^{x=L/2} 0,2B \left(\frac{L}{3} + 10 \right) \left(\frac{x}{L} \right)^2 \left[1 - \left(2 \frac{x}{L} \right)^2 \right] dx =$$

$$= 0,2B \left(\frac{L}{3} + 10 \right) \int_{x=0}^{x=L/2} \left(\frac{x^3}{L^3} - \frac{2^2 x^{5/2}}{L^{5/2}} \right) dx = \frac{0,2}{9} LB \left(\frac{L}{3} + 10 \right) \times$$

$$+ 10 \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{3+2\alpha} \right) = \frac{0,2}{24} LB \left(\frac{L}{3} + 10 \right) \times$$

$$\times \frac{\alpha}{\alpha+3} = \frac{0,2}{24} LB \left(\frac{L}{3} + 10 \right) \frac{\alpha}{3-2\alpha}.$$

Принимая $\alpha \approx \delta^{1,5}$ при $\delta = 0,68$, получаем $V_{\text{с.н.}} = 0,005 \text{ (8 LB (L/3) + 10)}$.

Учитывая, что $V_{\text{с.н.}}$ в два раза меньше $V_{\text{с.в.}}$, получаем полный объем (запас плавучести), создаваемый седловатостью: $V_{\text{с.}} = 1,5 V_{\text{с.н.}} = 0,0075 \text{ LB (L/3) + 10}$.

Относительный запас плавучести, создаваемый седловатостью, при $\delta = 0,68$, учитывая (8.3), будет

$$\frac{V_{\text{с.}}}{V} = 0,0075 \frac{LB \left(\frac{L}{3} + 10 \right)}{\Delta L B T} = 0,0112 \frac{1/3 + 10/L}{1/15 - H_{\text{с.н.}}/L} \quad (8.7)$$

В случае отказа от седловатости Правила Регистра СССР требуют увеличить минимальный надводный борт на величину $\Delta H_{\text{с.н.}} = 0,75 z_{\text{ср}}$, где $z_{\text{ср}}$ — среднее значение аппликатов седловатости. Величину $z_{\text{ср}}$ можно определить из выражения

$$z_{\text{ср}} = \frac{\int_{x=0}^{x=L/2} z_{\text{с.н.}} dx + \int_{x=L/2}^{x=L} z_{\text{с.к.}} dx}{L} = 1,5 \frac{\int_{x=0}^{x=L/2} z_{\text{с.н.}} dx}{L}.$$

Учитывая (8.5) и (8.6), получаем

$$z_{\text{ср}} = 1,5 \frac{0,2 \left(\frac{L}{3} + 10 \right) \int_{x=0}^{x=L/2} \omega/L^2 dx}{L} = \frac{0,3}{3,5} \left(\frac{L}{3} + 10 \right) =$$

$$= 0,0125 \left(\frac{L}{3} + 10 \right);$$

$$\Delta H_{\text{с.н.}} = 0,75 z_{\text{ср}} = 0,00937 (L/3 + 10).$$

Относительная плавучесть слоя высотой $\Delta H_{\text{с.н.}}$ будет при $\delta = 0,58$ и $\alpha = \delta^{1,5}$ с учетом (8.3)

$$\frac{\Delta F}{V} = \frac{\alpha \Delta H_{\text{с.н.}}}{\Delta L B T} = 0,00937 \frac{\alpha}{L} \frac{(L/3 + 10)}{T} = 0,00937 \times$$

$$\times \frac{1}{0,68^{1,5}} \frac{1/3 + 10/L}{1/15 - H_{\text{с.н.}}/L} = 0,0114 \frac{1/3 + 10/L}{1/15 - H_{\text{с.н.}}/L} \quad (8.8)$$

Из сравнения (8.8) с (8.7) видно, что суда со стандартной седловатостью и суда без седловатости имеют по существу одинаковый запас плавучести, если надводный борт последних удовлетворяет Правилам Регистра. Знать это особенно важно, так как последние вкратце многие суда, особенно больших размеров (например, супертанкеры), не имеют седловатости.

Следует заметить, что построить судно малой длины (меньше 100 м), следуя правилам, выбрав базисный табличный надводный борт и стандартную седловатость, нельзя. Чтобы иметь право назначить такому судну надводный борт, равный табличному базисному, необходимо наличие надстроек общей длиной не менее 0,35 L . При отсутствии надстроек к базисному значению надводного борта, указанному в таблицах, следует добавлять $\Delta H_{\text{с.н.}} = 2,625 \cdot 10^{-3} (100 - L)$.

Для гладкопалубного судна при $L = 24$ м $\Delta H_{\text{с.н.}} = 0,2$, т. е. его базисный надводный табличный минимальный борт (0,2) удваивается.

Из сказанного выше видно, что для судов длиной $L = 100 \div 365$ м относительный запас плавучести на основании формул (8.4) и (8.7), (8.8) (с усредненным коэффициентом) будет

$$\frac{F_{\text{с.н.}}}{V} = \frac{F_{\text{с.в.}}}{V} + \frac{\Delta F_{\text{с.н.}}}{V} = \frac{1,21}{(L/15H_{\text{с.н.}}) - 1} + 0,0113 \frac{1/3 + 10/L}{1/15 - H_{\text{с.н.}}/L} \quad (8.9)$$

Во втором члене формулы (8.9) знаменатель почти постоянен, так как второй член знаменателя много меньше 1/15 и изменяется слабо. Второй член формулы несколько уменьшается с увеличением L и колеблется для судов с $L = 100 \div 365$ м в пределах 0,07—0,09. Иначе говоря, та часть относительного запаса плавучести судна, которую обеспечивает седловатость или увеличенный надводный борт при ее отсутствии, составляет примерно 8 %.

Первый член формулы (8.9) собственно и определяет значение относительного запаса плавучести для судов типов А и В.

Наибольшие запасы относительной плавучести, которые обеспечивает высота базисного надводного борта, относятся к средним значениям промастка для $L = 100 - 365$ м; наименьшие — к его крайним значениям.

Для судов типа А эта часть запаса плавучести для малых, средних и больших значений L будет соответственно 0,25; 0,29; 0,30. Для судов типа В — 0,28; 0,39; 0,33.

Общий запас относительной плавучести для судов типа А составляет приблизительно от 27 до 35 %, а для судов типа В — от 35 до 48 %.

Судно минимальной длины, учитываемой Правилами Регистра ($L = 24$ м), имеет при отсутствии надстроек двойной по отношению к базисному надводный борт, и его относительный запас плавучести

$$\frac{W_{\text{нп}}}{V} = 2 \frac{1,21}{(L/15)H_{0, \text{нп}} - 1} + 0,0113 \frac{1,3 + 10\%}{0,15 - (H_{0, \text{нп}}/L)} = 0,343 + 0,143 = 0,486,$$

т. е. около 50 %.

8.5. Основные поправки к базисному надводному борту. Поддержание запаса плавучести. Смененный и избыточный надводный борт

Как уже отмечалось ранее, таблицы базисного надводного борта оставлены для судов с $\delta = 0,68$ и $L/H = 15$. Поправка на отсутствие седловатости рассмотрена в 8.4. Увеличивая δ , уменьшаем запас плавучести, как это видно из (8.4). Соответственно уменьшая L/H при неизменной длине L и неизменном надводном борту, увеличим $T = H - H_{0, \text{нп}}$ и таким образом уменьшаем запас плавучести.

В случае увеличения δ , а также при уменьшении L/H в соответствии с правилами нужно увеличивать минимальную величину надводного борта $H_{0, \text{нп}}$. Здесь δ должна рассчитываться по условиям сохранения $T/H = 0,85$ и условию L (см. 8.4).

При увеличении коэффициента обшей полноты δ свыше 0,68 к $H_{0, \text{нп}}$ по Регистру следует добавить

$$\Delta H_{0, \text{нп}} = \frac{\delta_1 - 0,68}{1,36} H_{0, \text{нп}}$$

Считая, что $\delta = 0,68$, $\delta_1 - \delta = \Delta\delta$, из вышесказанной формулы получим

$$\Delta H_{0, \text{нп}} = \frac{1}{2} \frac{\Delta\delta}{\delta} H_{0, \text{нп}}. \quad (8.10)$$

Рассмотрим изменения относительного запаса плавучести в результате изменения δ и L/H , используя формулу (8.2) при $k_0 = 0$,

т. е. без учета седловатости:

$$\Delta \left(\frac{W_{\text{нп}}}{V} \right) = \frac{\partial (W_{\text{нп}}/V)}{\partial \delta} \Delta\delta + \frac{\partial (W_{\text{нп}}/V)}{\partial L} \Delta L + \frac{\partial (W_{\text{нп}}/V)}{\partial H_{0, \text{нп}}} \Delta H_{0, \text{нп}} = - \frac{\Delta\delta}{2\delta^2} \frac{H_{0, \text{нп}}}{T} + \frac{1}{\delta^2} \frac{\Delta H_{0, \text{нп}}}{T}. \quad (8.11)$$

Чтобы определить необходимое изменение $H_{0, \text{нп}}$ при неизменной относительной плавучести и увеличении δ , нужно найти $\Delta H_{0, \text{нп}}$ из (8.11) при $\Delta (W_{\text{нп}}/V) = 0$, откуда

$$\frac{1}{\delta^2} \frac{\Delta H_{0, \text{нп}}}{T} = \frac{\Delta\delta}{2\delta^2} \frac{H_{0, \text{нп}}}{T},$$

а затем получаем и формулу (8.10). Таким образом, требования Правил Регистра СССР об увеличении $H_{0, \text{нп}}$ вытекают в данном случае повышения в части запаса плавучести, определенной первым членом (8.9).

Если $(L/H) < 15$, то по Регистру высоту надводного борта для поддержания запаса плавучести следует увеличивать.

Правила Регистра СССР обязывают в этом случае увеличивать базисный надводный борт на величину

$$\Delta H_{0, \text{нп}} = k_0 [H - (L/15)], \quad (8.12)$$

где $k_0 = (L/48) \cdot 10^{-3}$ при $24 \text{ м} < L < 120 \text{ м}$; $k_0 = 0,25$ при $L > 120 \text{ м}$. Если попытаться, основываясь на формуле (8.2), определить условия сохранения основного запаса плавучести при неизменном δ , то можно получить

$$\frac{H_{0, \text{нп}}}{T} = \frac{H_{0, \text{нп}}}{H - H_{0, \text{нп}}} = \frac{1}{(H/H_{0, \text{нп}}) - 1} = \text{const}.$$

Откуда $H_{0, \text{нп}}/H = \text{const}$; $\Delta H_{0, \text{нп}}/\Delta H = \text{const}$.

При отсутствии поправки на таблицы базисного надводного борта $\Delta H = H_T - L/15$, потому

$$\Delta H_{0, \text{нп}} = \Delta H \frac{H_{0, \text{нп}}}{H} = \frac{H_{0, \text{нп}}}{H} \left(H_1 - \frac{L}{15} \right) = 15 \frac{H_{0, \text{нп}}}{L} \left(H_1 - \frac{L}{15} \right), \quad (8.13)$$

где H_1 — новая полная высота борта; $H = L/15$ — исходная высота борта.

Из (8.13) следует, что коэффициент $k_0 = 15 (H_{0, \text{нп}}/L)$.

Сравним результаты численного коэффициента k_0 по формуле (8.12), т. е. по Регистру, и по формуле (8.13), т. е. исходя из условия сохранения запаса плавучести (табл. 8.1).

Как видно, Правила Регистра СССР обеспечивают равную (а иногда, вероятно, излишнюю) степень компенсации потери запаса плавучести при уменьшении L/H . При этом для судов $L \geq 120$ м почти во всех случаях компенсируется не только запас плавучести, соответствующий базисному надводному борту, но и запас плавучести, обеспечиваемый седловатостью. Личия суда малых длин ($L < 120$ м) не получают такой компенсации.

L, м	Значения $\Delta h_{\text{в.н.}}$ рассчитанные по формулам			
	0-10		10-20	
		Тип А	Тип В	
34	0,05	0,125	0,125	
48	0,10	0,131	0,131	
129	0,25	0,282	0,270	
240	0,25	0,284	0,282	
365	0,25	0,281	0,278	

Правила Регистра СССР предусматривают уменьшение минимального надводного борта судов, имеющих надстройки, так как последние увеличивают запас плавучести. Если длина надстроек



Рис. 8.3. Изменение к базисному надводному борту при общей длине надстроек, равной длине судна.



Рис. 8.4. Среднее значение базисного надводного борта при длине надстроек, меньшей длины судна: А — типоразмер; В — структура судна; В' — с базисом без разнородной средней надстройки; В' — со средней разнородной надстройкой; С — исключая.

равна длине судна, то значение базисного надводного борта нужно уменьшить на $\Delta h_{\text{в.н.}}$ (рис. 8.3), если меньше длины судна, то значение базисного надводного борта уменьшают на $\Delta h_{\text{в.н.}}$, умноженную на величину, определяемую по рис. 8.4.

Если на палубе судна находится надежно закрепленный груз леса, высота которого равна высоте надстроек и который занимает все пространство между ними, то запас плавучести увеличивается.

Суда, приспособленные для перевозки леса на палубе, получают дополнительную «свесную» марку. По эту марку лесовоз имеет право сидеть, если он принял палубный груз, удовлетворяющий указанным выше условиям. Палубный груз в этом случае увеличивает

запас плавучести, поэтому другую часть запаса плавучести, обеспечиваемого конструктивным надводным бортом, можно уменьшить, т. е. может быть уменьшен и сам конструктивный надводный борт.

Следует отметить, что возмещаемая высота надводного борта фактически может быть больше высоты минимального борта, определенного по «Правилам о грузовой марке морских судов». В данном случае речь идет о так называемом «обычном» надводном борте. Причиной такого увеличения является главным образом выполнение требований к вместимости судов и в редких случаях — непотопляемости.

До недавнего времени широко использовались суда особого конструктивного типа — шельфовые. Для таких судов минимальный надводный борт измерялся по закрытой непроницаемой палубе. Над этой палубой возвышался твиндек, борта в палуба которого были проницаемы (хотя бы условно).

8.6. Надводный борт в носовой оконечности судна

Вопрос о надводном борте в носовой части судна всегда интересовал проектировов. Заливаемость и забрызгиваемость палубы при волнении и под воздействием ветра — важный фактор, определяю-



Рис. 8.5. Погружение носовой части судна при движении на волнении: а — от дифферента; б — от морской волны; в — от ходовой волны.

щий высоту борта в носовой оконечности. Степень заливаемости и забрызгиваемости носовой части палубы, носовых надстроек и рубок в штормовую погоду зависит от формы обвода и размеров носовой части судна. Подъем воды над накатанной, по которую судно сидит с спокойной воде, обуславливается килевой качкой, высотой морской волны и высотой ходовой волны, образующейся при движении судна. Максимальный эффект заливания и забрызгивания получается при максимальном дифференте на нос во время килевой качки, при максимальной высоте морской волны и ходовой волны (рис. 8.5). Вершина ходовой волны с увеличением скорости судна смещается в направлении середины длины судна. Поэтому заливание палубы обычно происходит не, у самого форштевя, а в корму от него по направлению к середине длины.

На величину запыляемости и особенно забрызгиваемости влияет и курс судна относительно направлений бега волн и действия ветра. Когда эти направления совпадают, максимальный эффект их действия обнаруживается не при ходе вразрез волноа, а при курсовом угле движения судна относительно ветра и волнения 30—45°. В этом случае струи от волны, разрушающейся о борт, поднимаются по борту и, окончательно разрушаясь под действием ветра, заносится в виде брызговой пелены на палубу, надстройки, рубки и мостики, причём иногда большие повреждения.

Уменьшению забрызгиваемости способствуют острые застрелки в носовой оконечности.

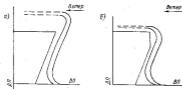


Рис. 8.6. Сами сломы брызговой пелены на палубу в носовой части судна: а — шпигуток без слома; б — шпигуток со сломам.

Корабельный инженер Н. С. Абаньин рекомендовал в целях уменьшения забрызгиваемости судна сохранять постоянный угол заострения надводных застрелок в его носовой части. Если при этом сохранять развал борта, то форштевень приобретает клиперскую форму.

Особенностью надводных обводов быстроходных судов в носовой части иногда является применение слома шпигуток у верхней палубы, приводящее к разрушению брызговой пелены на борту судна не у кромки открытой палубы, а вблизи, в точке слома шпигуток. Это уменьшает высоту, на которой брызговая пелена заносится ветром на палубу (рис. 8.6).

Чем быстрее идет судно, тем важнее тщательная отработка формы носовых обводов. Однако заряд с формой очень важным остается и высота борта в носовой части судна.

В. Хольгард построил график зависимости высоты борта при форштевнях линейных кораблей и линейных крейсеров от их скорости v . Используя график Хольгарда, аналитическую зависимость $H_{\text{н.н.}} = f(v)$ можно записать для $v \geq 20$ уз так: $H_{\text{н.н.}} = (v^2 \pm 1)$, где v — скорость судна, уз.

Конвенция 1966 г. и Правила Регистра СССР не ставят высоту борта в зависимость от скорости, но указывают, что минимальная

высота надводного борта (в метрах) у форштевня для судов при $L < 250$ м

$$H_{\text{н.н.}} = 0,056L \left(1 - \frac{L}{200}\right) \frac{1,36}{\delta + 0,68};$$

при $L > 250$ м

$$H_{\text{н.н.}} = 7 \frac{1,36}{\delta + 0,68},$$

где учитываются только значения δ , но не меньше 0,68.

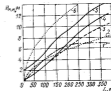


Рис. 8.7. Высоты надводного борта в носовой оконечности.

L — минимальная по нормам Регистра СССР; 1 — по рекомендациям Лодочного дела; 2 — $\delta = 0,14$ и $\gamma = 0,23$; 3, 4 — при выносе застрелки борта и регулировании запыляемости для судов типа А и В; 5 — с деформированной высотой бака в корме; 6 — с кромкой А.

Правила Регистра СССР требуют, чтобы эта часть надводного борта также была достаточной высоты.

У судов с баком, если его высота обеспечивает $H_{\text{н.н.}}$ бак в носовой оконечности должен иметь минимальную длину не менее $0,07L$, и у гладкопалубных судов протяженность высокого надводного борта в носовой части должна быть не менее $0,15L$.

На рис. 8.7 показаны высоты надводного борта в носовой оконечности, обеспечиваемые разными требованиями правил. По рисунку можно установить условия, которым должен удовлетворять надводный борт у форштевня судов типа А и В по Регистру СССР.

Конвенция 1966 г. еще недостаточно учитывала тенденции к значительному увеличению скоростей современных гражданских судов, поэтому следует с известной осторожностью пользоваться рекомендациями Регистра СССР и отнестись протязчивости высокого надводного борта носовой части. Можно предположить, что для судов со значительными скоростями (свыше 23—25 уз) протяженность бака или допалубия борта седловатостью должна обеспечивать высоту борта в носовой оконечности, близкую к высоте борта у форштевня на протяженности $0,20$ — $0,25$ длины судна для обеспечения достаточной сухости палубы, надстроек, рубок и мостиков. Большое значение высота борта в носовой части судна и протяженность бака приобретают для современных скоростных

контейнеровозов, у которых значительная часть груза (контейнеров) размещается на палубе и подвергается не только забрызгиванию, но и заливанию с носа. Были отмечены даже случаи сноса в море части контейнеров падающей на палубу водой.

8.7. Обеспечение непотопляемости. Расстановка переборок

Совершившийся в XIX в. решительный переход от деревянного судостроения к железнному, а затем к сталеному обострил проблему непотопляемости судна. Целый ряд трагических закономерных аварий боевых кораблей — английского броненосца «Викторин» (1893), русских кораблей «Русалка» (1893) и «Гангут» (1897) — привлекла внимание специалистов по вопросам непотопляемости. Вопросы непотопляемости боевых кораблей разрабатывались С. Д. Макаровым, А. Н. Крыловым, И. Г. Вульфом.

На рубеже XIX и XX в. резко возросли размеры пассажирских судов, особенно тех трансокеанских лайнеров, которые поддерживали сообщение между Европой и Америкой. Представлялось, что увеличение размеров этих судов гарантирует их безопасность. Эти иллюзии были, однако, рассеяны гибелью английского трансокеанского лайнера «Титаник» после столкновения его с icebergом в 1912 г. «Титаник» затонул в течение 2 часов 40 минут. Вместе с ним погибло 1490 человек. Английский суд, разбиравший дело о гибели «Титаника», признал единственной причиной его гибели — слишком большую скорость, с которой это судно. Никакие конструктивные особенности судна, которые могли бы быть причиной его гибели, в решении суда не упоминались 1951. Вопрос об обеспечении непотопляемости пассажирских и грузопассажирских судов стал после гибели «Титаника» предметом обсуждения на международных конференциях по обеспечению человеческой жизни на море.

Две мировые войны, особенно вторая (1939—1945), показали большое военное значение гражданских судов, ставших объектом применения тех видов оружия, которые воздействовали на их непотопляемость (торпеды, авиабомбы крупного калибра) 149.

Конец июня 1960 г. по охране человеческой жизни на море сделаны известные шаги в направлении обеспечения непотопляемости грузовых судов. Заключенные на конференциях по обеспечению человеческой жизни на море соглашения содержат нормы, диктующие условия расстановки водонепроницаемых переборок на судах.

Как известно, судно на водонепроницаемые отсеки делится путем установки преград:

вертикальных или близких к вертикали продольных и поперечных переборок;

горизонтальных или близких к горизонтали (палубы, платформы, вставки двойного дна).

Использование горизонтальных преград в комбинации с поперечными переборками ограничивает распространение воды и до

вертикали и по горизонтали и является весьма эффективным средством обеспечения непотопляемости. Р. Н. Ловягин показал, что даже пробоина длиной около 90 м, которую выдала «Титаник», не вызвала бы его гибели, если бы его нижние платформы были водонепроницаемы 155.

Однако устройство непроницаемых платформ и палуб является в противоречие с эксплуатационными требованиями, особенно в отношении судов, на которых для перемещения грузов нужны люки. Для большинства сухогрузных судов наиболее приемлемыми водонепроницаемыми преградами являются поперечные переборки. Следует отметить, что недавно возникшая на некоторых судах схема переборки типа «ро-ро» (от англ. roll on—roll off, т. е. «катать» — «выкатывать») нарушает целостность поперечных переборок и, следовательно, угрожает непотопляемости. Поэтому при применении такой схемы переборки следует особо внимательно рассматривать фактическую непотопляемость проектируемого судна. Идея установка на таких судах переборок с огромными дверями может оказаться иллюзией, хотя водонепроницаемость этих дверей весьма относительна. Дело в том, что указанные двери хотя и не отсекут полностью переток воды из отсека в отсек, но замедлят ее распространение и увеличат таким образом время, в течение которого судно будет держаться на воде. Увеличение этого времени улучшает условия спасения экипажа.

Второе дно можно рассматривать как преграду, которая может спасти судно в случае тяжелых навигационных повреждений. Известен случай, когда броненосный крейсер «Юрикс» в 1915 г. получил ряд пробоин днаца, совершивших непроницаемость практически по всей длине корабля (около 180 м), принял 2800 т воды (содержа 17 % полного водоизмещения) и благодаря наличию двойного дна остался на плаву, вернулся на базу, где был отремонтирован и возвращен в строй 195.

К тому же междудоное пространство ценно как хранилище топлива и балласта, регулирующего поперечную остойчивость судна и его дифферент. В последнее время делается попытка строить танкеры с двойным дном. Междудоное пространство дает возможность предотвращать случаи сильного загрязнения нефтью больших акваторий при посадке танкеров на камни.

Продольные водонепроницаемые переборки широко использовались в военном кораблестроении, особенно на крупных кораблях, на которых образовывали так называемую противоминную защиту (ПМЗ) или, точнее, защиту против взрывных атак. Однако, несмотря на то что продольные водонепроницаемые переборки обеспечивают безопасность расположенных внутри корабля ЭУ, их применение было опасно и т. д., они в то же время опасны, так как при затоплении их могут возникнуть значительные крены 2, 491.

Если бортовые отсеки, ограниченные продольными переборками, заполняются, по выражению С. О. Макарова, «подоскочившей средой», например топливом, то опасность возникновения крена от их заполнения исчезает. Поэтому рационально использо-

вать такие отсеки, как топливные цистерны. В случае опорожнения этих цистерн их следует заполнить забортной водой.

Известен случай, когда продольные переборки сыграли неблагоприятную роль в гибели судна, получившего пробоину. Так, итальянский пассажирский лайнер «Адрен Дорна» в 1966 г. получил пробоину в носовой части в районе топливных цистерн, отделенных от борта продольными переборками (рис. 8.8). Следствием аварии явились значительный крен и дифферент судна, в результате чего оно затонуло [59]. Топливо, карасодержащее из указанных цистерн, по инструкции должно было быть заменено водой, однако инструкция не была выполнена.

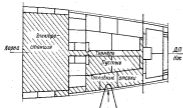


Рис. 8.8. Схема затопления отсека судна «Адрен Дорна» в районе пробоины.

На современных балластных танкерах продольные переборки необходимы, так как они ограничивают ширину и объем грузовых цистерн и обеспечивают прочность этих широких судов. Особой опасностью наведения танкера при получении пробоины является, так как здесь груз играет роль выходящей среды.

В настоящее время на ряде сухогрузных судов ставятся продольные водонепроницаемые переборки и устраивается двойной борт по разным причинам: для обеспечения прочности судов и облегчения грузовых операций (суда с большим раскрытием люков), а для обеспечения плавности качки (подпалубные бортовые балластные цистерны рудозабор — для уменьшения устойчивости). Влияние затопления отсеков на крен этих судов после затопления должно проверяться при проектировании [58].

Как видно из выше изложенного, поперечные переборки играют важную роль в эксплуатационном отношении и в обеспечении прочности судна, поэтому их обычно рассматривают как основные водонепроницаемые перегородки при решении вопросов непотопляе-

мости, тем более что установка поперечных переборок не может считаться причиной крена при затоплении отсеков.

Положение судна после затопления какого-либо его района рассматривается относительно так называемой предельной линии погружения, т. е. палубы, до которой доходят водонепроницаемые поперечные переборки.

Расчет непотопляемости судна и расстановка переборок, обеспечивающих его непотопляемость, могут основываться на двух подходах.

Первый подход — *детерминированный* — обеспечение непотопляемости в наиболее тяжелом случае затопления и наиболее неблагоприятном случае нагрузки.

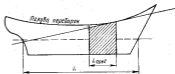


Рис. 8.9. Схема средней линии предельной линии отсека.

Второй подход — *вероятностный* — обеспечение наибольшей вероятности сохранения судна на плаву в условиях неравномерной его нагрузки и с учетом вероятного распределения повреждений по длине судна.

Второй подход в настоящее время получил наибольшее распространение при оценке непотопляемости судна. В частности, он рассматривается как основной в «Правилах классификации и постройки морских судов Регистр СССР», хотя Регистр допускает и применение первого подхода при соответствующем согласовании с Регистром.

В начальных стадиях проектирования удобнее пользоваться первым подходом. Только в эскизном проекте может быть получена достаточная информация для осуществления второго подхода.

В первую очередь здесь рассматривается первый (детерминированный) подход.

Затопляя отсеки между двумя поперечными переборками, мы заставляем судно менять осадку и дифферент, приняв любую точку по длине судна за середину расстояния между переборками и зная расстояние между ними, можно получить такую длину отсека, при затоплении которого равновесная ВЛ коснется предельной линии погружения (рис. 8.9). Такая длина отсека называется его предельной длиной. При определении предельной длины отсека учитывается его пронаiveness, зависящая от назначения отсека

УСЛОВНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА μ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПО ПРАВИЛАМ РЕГИСТРА СССР

Назначение помещений и характер их заделывания

Помещения, занятые механизмами, электростанциями, вентиляционными оборудованием на грузовых судах	0,85
Жилые помещения, каюты с экипажем	0,55
Затопляемые жилые палубы и палубы	0,00
Пороховые палубы, переборчатые помещения, кладовые	0,55
Пороховые резервуарообразные трюмы	0,00
Помещения, занятые генеральным трюмом для пассажирских (включая) грузов для пассажиров (включая) трюмом для пассажиров	0,60
Кладовые, занятые общим трюмом	0,35
Помещения, занятые рулевым и эксплуатационными судами*	0,80
Грузовые помещения каботажных судов	0,80
Машинные отделения (МО) пассажирского судна	$0,85 + 0,1(a-c)$

(такс a — объем жилых помещений ниже предельной линии погружения в границах МО; c — объем межпалубного пространства, занятого под груз, только в том случае, если предельная линия погружения между соседними переборками МО; b — полный объем помещений ниже предельной линии погружения)

Пассажирские помещения в нос и корму от МО $0,83 + 0,35a/b'$
(такс a' — объем жилых помещений ниже предельной линии погружения в нос или корму от МО; b' — полный объем части судна ниже предельной линии погружения в нос или корму от МО)

Восстанавливая перпендикуляры к основной линии (ОЛ) судна и откладывая на них длины предельных отсеков, середины длины которых находятся в данной точке, получаем кривые предельных длин отсеков (рис. 8.10). Там, где дифференцирующий момент от затопления отсеков близок к нулю, т. е. около середины длины судна, предельные отсеки имеют наибольшую длину. Эта длина увеличивается от середины длины судна к оконечностям, поскольку при затоплении отсеков, удаленных от середины длины судна, дифферент играет все большую роль. Приблизительно на четверти длины от оконечности дифференцирующий момент начинает падать из-за уменьшения объема затопляемого отсека. Кривую ограничивают двумя наклонными, проведенными из концов основной линии судна под углом $\varphi = \arcsin \beta$. Середина длины последнего отсека, затопление которого вызывает погружение судна до предельной линии погружения, отстоит от форштевя на половину длины этого отсека. На рис. 8.10, а нанесены кривые предельных длин отсеков для коэффициентов проницаемости $\mu = 1,0$ и $\mu = 0,5$, а на рис. 8.10, б — кривая для судна, у которого коэффициент проницаемости МО, расположенного в корме, $\mu = 0,8$, остальной части $\mu = 0,6$.

* У рулевого отделения трюмы определяются для спецификационных случаев загрузки по расчету с учетом удаленных погруженных объемов груза.

Расчет кривых основывается на известных формулах теории корабля для изменения посадки судна при затоплении отсека.

Для того чтобы учесть безопасность судна при получении им пробоины, вводится понятие *допустимой длины отсека* и фактора деления, или как он называется в Правилах Регистра СССР, фактора деления. Отношение допустимой длины отсека к его предельной длине называется фактором деления F .

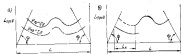


Рис. 8.10. Кривые (a , б) предельных длин отсеков при разных коэффициентах проницаемости.

Фактор деления является важной характеристикой непотопляемости судна, разбитого на отсеки поперечными непроницаемыми переборками. Его следует соотносить с другой характеристикой,

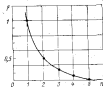


Рис. 8.11. Связь фактора деления с предельным числом затопляемых отсеков.

часто применяемой для оценки непотопляемости судна: предельным числом отсеков n , затопление которых судно выдерживает, оставшись на плаву.

При данном числе отсеков, затопление которых вызывает капитан аварийной ВЛ с предельной линии погружения, фактор деления

$$F = 1/n. \quad (8.14)$$

Обратная зависимость

$$n = 1/F \quad (8.15)$$

может привести к неверным результатам, поскольку F следует

считать непрерывной величиной, а n принимает дискретные значения, выраженные целыми числами.

На рис. 8.11 графически показана связь между F и n . Кружками отмечены значения F , соответствующие ряду $n = 1, 2, 3, 4, 5$.

Регистр СССР впервые в мире установил требования, предъявляемые к непотопляемости гражданских судов любого назначения. Эти требования для большинства грузовых, промысловых судов и судов технического флота перечислены в табл. 8.2.

Таблица 8.2

ТРЕБОВАНИЯ РЕГИСТРА СССР, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К НЕПОТОПЛЯЕМОСТИ СУДОВ РАЗНЫХ НАЗНАЧЕНИЙ

Назначение судна	Длина судна L , м	Фактор деления F
Грузовые суда с ледовыми усилителями класса УЛД	$90 < L < 100$	1,0
	$L > 100$	0,5
Грузовые суда с ледовыми усилителями класса УЛ	$L > 90$	1,0
	$L > 75$	0,5*
Ледоходы	$L > 75$	0,5
	$L > 120$	1,0
Грузовые суда без ледовых усилителей	$100 < L < 150$	1,0
	$L > 150$	0,5
Суда промысловые, экспедиционные и прочие специализированные суда	$L > 90$	1,0
Двухпалубные буксиры и толкачи	Любая	1,0
Специальные суда и плавающие краны	"	0,5
Суда, перевозящие радиоактивные материалы	"	0,5

*Для тех отсеков ледоходов, у которых нет двойного борта, $F=0,1$

Из рассмотрения этой таблицы следует, что фактор деления на отсеки гражданских судов (непассажирских) принимается в двух вариантах: $F = 1$, т. е. $n = 1$ — одноотсековый стандарт непотопляемости; $F = 0,5$, т. е. $n = 2$ — двухотсековый стандарт непотопляемости.

Как правило, требования, предъявляемые к непотопляемости большинства указанных в таблице судов, обязательно, начиная с определенной длины. Требования эти ужесточаются с увеличением длины судна. Для ледоколов они выше, чем для других судов такой же длины.

Таким образом, чем больше размер судна и чем тяжелее условия его эксплуатации, тем более жесткими становятся требования к непотопляемости судна. Особые требования предъявляются к судам, на борту которых во время рейса являются радиоактивные материалы — во всех случаях эти суда, независимо от их размеров, должны иметь двухотсековый стандарт непотопляемости, поскольку гибель такого судна может вызвать радиоактивные заражения акватории, в которой произошла авария. Для военных кораблей естественным минимальным требованием является сохранение их

на плаву при $n = 3$ ($F = 0,333$), что подтвердилось опытом первой и второй мировых войн [49, 96].

Фактор деления F для пассажирских судов зависит от так называемого критерия саркофа S_2 , который характеризует приспособленность судна к перевозке людей.

Конвенция 1966 г., а также Правила Регистра СССР фиксируют порядок распределения переборок пассажирских судов. Для выполнения этого распределения следует руководствоваться либо непосредственно правилами Регистра СССР, либо «Обзорным нормативно-методическим материалом. Книга вторая Регистра СССР», где есть статья «Эквивалентная замена требований раздела 2. Часть V. Деление на отсеки Правил классификации и постройки морских судов Регистра СССР».

На критерий S_2 влияет относительная величина объема жилых помещений и объем помещений ЭУ с толстыми штернами по отношению ко всему объему ниже пирольной линии погружения. Учитывается при этом количество пассажиров и объем пассажирских помещений выше пирольной линии погружения.

Вычисления по формулам и учет ряда оговорок в правилах приводит к тому, что большинство пассажирских судов при $L \geq 65$ м имеет двухотсековый стандарт непотопляемости ($F = 0,5$). Для очень длинных пассажирских судов ($L \geq 242$ м) фактор $F < 0,5$ и стремится к $F = 0,333$, т. е. к трехотсековому стандарту непотопляемости.

Даже при отсутствии продольных переборок и симметричном затоплении следует в процессе проектирования проверить, имеет ли судно положительную аварийную остойчивость. Мерой этой остойчивости считается по Регистру метасимметрическая высота, равная не менее 0,05 м, рассчитанная методом постоянного водоизмещения. Для пассажирских судов может быть назначена и большая метасимметрическая высота.

При назначении продольных переборок возможно появление кренов, что может привести к трагическим последствиям (пример лайнера «Андреа Дорна»). Регистр предъявляет требование к величине угла крена до спрямления и после него. Он также требует, чтобы окончательная аварийная ВЛ поврежденного судна проходила, как правило, ниже палубы переборок. Исполнение судна после аварии в свое время была предложена А. Н. Крыловым и разрабатывалась в военном флоте. Можно отметить, что спрямление требует большого внимания при практическом применении. Требуется разработать таблицы непотопляемости и процесс выпуска рабочих чертежей судна, обеспечить вывод правдоподобного затопления балластных штерн в эквивалентные места и т. д. Авария «Андреа Дорна» произошла не только вследствие невыполнения инструкции о затоплении, но и из-за отсутствия дистанционного управления затоплением отсеков.

Регистр СССР рекомендует обеспечивать аварийную диаграмму остойчивости прочностью 20° при несимметричном и 50° при симметричном затоплении с максимальной площадью 0,1 м.

Глубину повреждения при аварии учитывают в том случае, когда расположение водонепроницаемых преград таково, что возникает несимметричное затопление. Глубина повреждения принимается по Регистру СССР равной 0,2 ширины судна, а для пассажирских судов — 0,5 ширины судна. Могут иметь место случаи, когда менее глубокие повреждения будут угрожать непотопляемости судна сильнее, чем упомянутые выше. Такие случаи должны быть рассмотрены особо. Следует обращать внимание на то, чтобы трубы, шахты и т.п. не оказались путями распространения заборной воды при аварии и не стали причиной затопления судна.

При устройстве двойного борта и двойного дна следует тщательно изучить вопрос о том, где устанавливать водонепроницаемые экраны. Иногда может оказаться выгодным, особенно для малых судов, делать вертикальный киль провиантом, что устранит причину возникновения арена. Обеспечить правильную расстановку переборок важно на более ранних стадиях проектирования, чтобы избежать изменений в проекте.

Построение кривой предельных и допускаемых длин отсеков может быть выполнено сразу после построения стоевой по шанпоутам, средней ВЛ и ГВЛ.

Для возможности решения вопроса о накрененности судна при несимметричном затоплении необходимо иметь теоретический чертеж и схему общего расположения.

Во всех расчетах при первом (детерминированном) подходе исходным положением судна считается, как правило, посадка его по ГВЛ (КВЛ), соответствующую полную водозащитенно. В некоторых случаях это положение может занимать разные положения (например, для сухогрузных судов, принимающих генеральный или лесной груз), в соответствии с чем объем расчетов может быть расширен.

В данном параграфе рассматривались лишь затопление смежных отсеков. Такое затопление при наводнениях повреждениях является наиболее вероятным и в то же время более тяжелым, чем затопление того же числа несмежных отсеков.

Международная конвенция 1973 г. по предупреждению загрязнения моря внесла много дополнений в вопрос расстановки переборок на танкерах. Так, конвенция выдвигает требования по непотопляемости танкера и по ограничению количества вытесненного в море груза при аварии, не вызвавшей его гибели.

Таким образом, расстановка переборок на танкерах диктуется не только обеспечением непотопляемости, но и обеспечением удержания максимального количества груза в корпусе поврежденного судна. Ряд требований такого рода уже перечислен в 5.9.

При расчете вылива нефти и непотопляемости танкера дана проблема в борту для танкера $L > 287$ м ($L = 0,96 L_{КВЛ}$) принимается равной 14,5 м. Для танкеров $L < 287$ м длина пробоя считается равной $L^{0,3}$.

Для танкера $B > 57,5$ м расчетная глубина повреждения в

борту $B_{\text{рас}} = 11,5$ м; для танкеров $B < 57,5$ м эта глубина составляет $B/3$.

Для повреждения дна в расчете непотопляемости на протяжении 0,3 L от носового переборки принимается такой же, что и расчетная длина повреждения борта. Для этого же носового района танкеров $B > 60$ м поперечный размер пробоя берется равным 10 м и $B/6$ при $B < 60$ м. На остальной части длины танкера ширина повреждения дна принимается равной 5 м.

Пробоя в борту считается ограниченной по высоте. Повреждения дна при $B > 90$ м могут проникать на глубину $B_{\text{рас}} = 6$ м, при $B < 90$ м — на глубину $B_{\text{рас}} = B/15$.

Пробоями указанных размеров не должны вызываться затопления судов $L > 225$ м при их наличии в любом районе судна; судов $150 \text{ м} < L < 225$ м при их наличии в любом районе, кроме района носовой и хвостовой переборки МО; судов $L < 150$ м при их наличии в любом районе МО.

Для судов $L < 100$ м допустимы отступления и от этих требований. Предельный крен при затоплении бортовых отсеков может достигать 25° и даже 30° , если при этом кривая перпендикуляра не выйдет в воду.

Расстояния между поперечными переборками $L_{\text{отс}}$ не должны быть меньше 10 м. Они могут превышать эту величину у следующих судов:

для продольной переборки $L > 100$ м: $L_{\text{отс}} = 0,1 L$;
с одной диаметральной переборкой $L > 150$ м: $L_{\text{отс}} = 0,15 L$;
с двумя или большим количеством продольных переборок; для бортовых танков при $L > 200$ м: $L_{\text{отс}} = 0,20 L$; для средних танков шириной, равной или большей $B/5$, при $L > 200$ м: $L_{\text{отс}} = 0,2 L$; для средних танков шириной $B_1 < \frac{1}{5} B$ (при отсутствии диаметральной переборки): $L_{\text{отс}} = [0,5 (B_1/B) + 0,1] L$; для средних танков (при наличии диаметральной переборки): $L_{\text{отс}} = [0,25 (B_1/B) + 0,15] L$.

Конвенция 1973 г. по предотвращению загрязнения моря с судов (МАРПОЛ 73/78) предъявляет к танкерам и другим судам, перевозимым нефть, ряд других требований, которые следует учитывать при проектировании. Здесь же перечислены лишь важнейшие требования, могущие оказать влияние на размеры и архитектурно-конструктивный тип танкера.

Рассматривая требования Конвенции 1973 г., можно отметить ряд их особенностей. Требования по сохранению непотопляемости ужесточаются по сравнению с ранее действовавшими. Увеличено предельное значение расчетных размеров повреждения. Хотя и в слабой степени, но учитывается большая вероятность повреждения в носовой части судна, т. е. имеются пометки вероятностного подхода к обеспечению непотопляемости.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ХОДКОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

9.1. Постановка задачи

Для того чтобы заданное значение скорости было подтверждено в проекте и достигнуто затем построенным судном, следует учесть сопротивление воды движению судна, действие его двигателя и, наконец, взаимодействие системы «корпус—двигатель—двигатель».

Сопротивление воды движению судна зависит от его размеров (водоизмещение, размерения), коэффициентов полноты и некоторых других характеристик формы и вместе с характеристиками двигателя определяет мощность N энергетической установки (ЭУ). Без знания, хотя бы в первом приближении, мощности ЭУ нельзя определить и размер самого судна. Поэтому сразу же после появления на судах ЭУ, т. е. более полутора веков назад, стали разрабатываться зависимости, связывающие мощность ЭУ N со скоростью судна v и его водоизмещением D или V . Малое количество величин, входящих в эти зависимости в начальном периоде проектирования, соответствует ограниченному числу данных в этот период о судне. Ограниченность данных снижает точность этих зависимостей. Следует, однако, учесть, что новые статистические исследования по большим группам судов повысили точность приближенных формул [20]. Известно, что достаточно точный подсчет мощности ЭУ судна выполняется только после отыскания его водоизмещения и ряда других характеристик по алгоритму, не укладываемому в одну формулу. Окончательно мощность ЭУ и скорость проектируемого судна определяются обычно в ходе испытаний в бассейне модели этого судна и пересчета результатов испытания на натуру. Даже в последнем случае результаты иногда бывают небезуверенными.

9.2. Основы расчета потребной мощности энергетической установки

Сопротивление воды и воздуха движению судна преодолевается благодаря работе его ЭУ, энергии использования мощности которой (полное действие) зависит от ряда факторов.

На значение мощности двигателя, необходимой для поддержания заданной скорости на испытании или в эксплуатации, влияют

сопротивление судна, зависящее от геометрических характеристик его корпуса (от его главных размерений; коэффициентов полноты, а также некоторых других характеристик формы), состояния части судовой поверхности, погруженной в воду (смокрой поверхности); температуры и солёности воды, глубины фарватера, талая и характеристики донного слоя, в том числе и таких, которые зависят от его расположения, и, наконец, характера передачи мощности от двигателя к двигателю.

В основу расчета сопротивления обычно кладется сопротивление воды движению так называемого голого корпуса R , приняв курсом на тельо воде:

$$R_s = R_T + R_\Phi + R_{\text{вн}}, \quad (9.1)$$

где R_T , R_Φ и $R_{\text{вн}}$ — сопротивление трения, формы и волновое соответственно.

Сопротивления R_T и R_Φ определяются вязкостными свойствами воды, а в последнее время часто рассматривается их сумма — вязкостное сопротивление

$$R_{\text{внв}} = R_T + R_\Phi$$

Значительный объем информации по сопротивлению воды, накопленный в опытовых бассейнах в течение почти столетия, базировался на определении так называемого остаточного сопротивления

$$R_{\text{ост}} = R_m + R_\Phi.$$

При изучении влияния несомых булболов на ходкость сделана попытка ввести новый компонент сопротивления от разрушения носовой волны [83, 84].

При создании теоретического чертежа, т. е. судовой поверхности, приходится обращать внимание на каждую из трех составляющих сопротивления, входящих в формулу (9.1).

Обычно сопротивление R , связывается со скоростью и размерениями судна и физическими характеристиками воды следующим выражением:

$$R_s = \zeta_0 \frac{\rho v^3}{2} \Omega + \zeta_\Phi \frac{\rho v^3}{2} \Omega + \zeta_{\text{вн}} \frac{\rho v^3}{2} \Omega = (\zeta_T + \zeta_\Phi + \zeta_{\text{вн}}) \times \frac{\rho v^3}{2} \Omega = \zeta \frac{\rho v^3}{2} \Omega, \quad (9.2)$$

где ζ_0 — коэффициент сопротивления трения голого корпуса; ζ_Φ — коэффициент сопротивления формы; $\zeta_{\text{вн}}$ — коэффициент волнового сопротивления; ρ — плотность воды; v — расчетная скорость; Ω — площадь смоченной поверхности; ζ — коэффициент полного сопротивления голого корпуса.

Следует учесть, что с увеличением смоченной поверхности физически связано только сопротивление трения. Введение в выражение для волнового сопротивления $R_{\text{вн}}$ и сопротивления формы R_Φ величинами Ω является условным приемом. Это надо учитывать

в ряде случаев, например при рассмотрении клинчат длины судна L на $R_{\text{кл}}$ и $R_{\text{д}}$, а частности когда с увеличением L уменьшаются эти составляющие сопротивления. Уменьшением $\zeta_{\text{кл}}$ и $\zeta_{\text{д}}$ должно при этом компенсировать не только общее падение сопротивления, но и рост Q .

Как известно, значение валаковой составляющей сопротивления зависит от безразмерного числа Рейнольдса $Re = \rho L v$, где v — скорость; ν — коэффициент кинематической вязкости.

Значение валакового сопротивления зависит от безразмерного числа Фруда (относительной скорости): $Fr = v/\sqrt{gL}$, где g — ускорение свободного падения. Хотя наиболее рационально принимать L по грузовой ватерлинии, часто берется L между перпендикулярами. Так, почти во все статистические данные по гражданским судам входит эта величина (см. 4.1).

Общее сопротивление R , зависит, как видно из предыдущего, и от Re , и от Fr .

К числу формулы (9.2), определяющему сопротивление трения, образующиеся на смоченной поверхности судна и рассматриваемое как сопротивление трения акваланговой гладкой пластины^{*}, делится так называемая надбавка на шероховатость, учитывающая клинчат сварных (или клепаных) швов, окраски и желатидности смоченной поверхности. В результате коэффициент сопротивления трения смоченной поверхности судна $\zeta_{\text{тр}} = \zeta_{\text{сг}} + \zeta_{\text{ш}}$, где $\zeta_{\text{сг}}$ — коэффициент трения эквивалентной пластины; $\zeta_{\text{ш}}$ — так называемая надбавка на шероховатость. Совершенно естественно, что в случае оброста судна надбавка на шероховатость растет. При подготовке судна к сдаточным испытаниям, как правило, производится очистка и окраска подводной поверхности, вследствие чего надбавка на шероховатость должна быть уменьшена.

К рассчитанному сопротивлению судна с учетом шероховатости обычно добавляется еще воздушное сопротивление (2—4% от полного сопротивления) и сопротивление выступающих частей. Правда, применяемые в настоящее время на однопалубных судах обтекаемые стартовы и рули снижают сопротивление судна. Однако у многопалубных судов даже традиционные расположенные обтекаемы кронштейны гребных валов могут увеличивать сопротивление на 4—8%.

Все источники изменения сопротивления могут быть учтены введением некоторого коэффициента** $(1 + \sigma)$. В результате полное сопротивление

$$R = (1 + \sigma) R_0 \quad (9.3)$$

Тогда мощность, используемая непосредственно на движение судна, или так называемая брусомидельная мощность, запишется

* Имеет ту же длину и ту же смоченную поверхность, что и судно, и, таким образом, больше, чем судно, осадку.

** Иногда вместо вводимого коэффициента $(1 + \sigma)$ добавляется в формулу (9.2) члены, учитывающие выступающие части $\zeta_{\text{ш}}$ и воздушное сопротивление $\zeta_{\text{в}}$.

в виде $N_0 = Rv$, где N_0 — в киловаттах; R — в килоньютонках; v — в метрах в секунду.

В обширной литературе по судостроению, в частности посвященной вопросу скорости судна, встречается величина мощности в лодочных силах. При переводе единиц следует помнить, что 1 л. с. = 0,736 киловатта.

Мощность, развиваемая двигателем*, освобождающим судно постоянную скорость v ,

$$N = \frac{Rv}{\eta_{\text{пр}}} \quad (9.4)$$

или $N = (RQ)/\eta_{\text{пр}}$.

В этих выражениях $\eta_{\text{пр}}$ — пропульсивный коэффициент, учитывающий полезное действие двигателя и взаимодействие его с корпусом судна; $\eta_{\text{в}}$ — коэффициент полезного действия валапровода с передачей (редуктор); $\eta_{\text{к}}$ — общий КПД системы двигателя—двигатель—корпус судна.

Пропульсивный коэффициент

$$\eta_{\text{пр}} = \eta_{\text{д}} \eta_{\text{в}} \eta_{\text{к}} \quad (9.5)$$

где $\eta_{\text{д}}$ — коэффициент полезного действия двигателя, работающего в свободном равномерном потоке без присутствия корпуса судна; $\eta_{\text{в}}$ — коэффициент неравномерности потока; $\eta_{\text{к}}$ — коэффициент клинчат корпуса, равный

$$\eta_{\text{к}} = \frac{1 - \epsilon}{1 - \alpha} \quad (9.6)$$

где ϵ — коэффициент засасывания, т. е. коэффициент усиления сопротивления движению судна вследствие разрежения, создаваемого работой двигателя; α — коэффициент полезного потока, т. е. отношение средней скорости попутного потока воды, увлекаемой вихревыми силами, действующими в воде у смоченной поверхности судна, к скорости судна.

Неравномерность потока, поступающего к двигателю, может в некоторых случаях оказывать значительное влияние на работу двигателя. Клинчатая кронштейны гребного вала может также снизить $\eta_{\text{к}}$ гребного вала, что учитывается величиной ϵ , которая в этом случае может быть много меньше единицы.

Коэффициент полезного действия валапровода $\eta_{\text{в}}$ вычисляется в зависимости от места замера мощности. Для двигателя внутреннего строения непосредственно за двигателем замеряется так называемая тормозная мощность, а тогда коэффициент полезного действия валапровода с передачей $\eta_{\text{в}} = \eta_{\text{м}} \eta_{\text{п}}$, где $\eta_{\text{м}}$ — коэффициент полезного действия передачи (механической, гидравлической, электрической).

* Обычно говорят «мощность ЗУ», но под этим термином понимают мощность главного двигателя, а не совокупную мощность всей ЗУ, т. е. мощность двигателя плюс мощность его вспомогательных механизмов.

Для двигателей [48] можно принимать следующие величины: $\eta_{\text{к.г.}} = 0,97$ — для прямой передачи; $\eta_{\text{к.э.}} = 0,94$ — для механического редуктора; $\eta_{\text{к.р.}} = 0,88$ — для электроредуктора.

Для турбин замеряются так называемая мощность на валу и коэффициент $\eta_{\text{к.р.}} = \eta_{\text{к.э.}}$, причем значение $\eta_{\text{к.э.}}$ в зависимости от места установки тахометра может оказаться весьма близким к единице.

Коэффициент $\eta_{\text{к.р.}}$ колеблется в широких пределах и в сильной степени зависит от частоты вращения двигателя.

Для того чтобы с большой степенью достоверности определить требуемую мощность ЭУ, нужно знать с достаточной точностью сопротивление галог корпуса, коэффициент вязкости корпуса $\eta_{\text{к.}}^{\text{в}}$, коэффициент полезного действия двигателя $\eta_{\text{д.}}$. Все расчеты этих величин могут быть сделаны и затем уточнены после установления размеров и коэффициентов формы проектируемого судна. В ряде случаев можно воспользоваться систематизированными результатами экспериментов — графиками сопротивления, графиками элементов и КПД двигателя. В необходимых случаях нужно ставить эксперимент — испытывать модель судна и модель двигателя. При определении же водозмещения, размеров и коэффициентов в начальных стадиях проектирования (см. 2.5) приходится искать связи мощности с ограниченным количеством величин, и прежде всего с водозмещением и скоростью.

9.3. Определение мощности по формуле адмиралтейских коэффициентов

Задача выражения мощности через такие общие характеристики судна, как водозмещение и скорость, что позволяет успешно решать уравнение накрутки, является настолько же важной, насколько и трудной. Обращаясь к формулам (9.2) — (9.4), можно записать

$$N = \frac{R_0}{\eta_{\text{к.г.}}} = \frac{1+\varepsilon}{\eta_{\text{к.г.}}} R_0, \text{ где } R_0 = \frac{1+\varepsilon}{\eta_{\text{к.э.}}} \zeta \frac{\rho_0 V^3}{2} \Omega^2. \quad (9.7)$$

Преобразовывая известную формулу Тейлора $\Omega = k_1 \sqrt[3]{V}$ (см. 9.8), получаем

$$\Omega = k_1 V^{2/3} \left(\frac{1}{V^{1/3}} \right)^2 = k_1 V^{1/3} \Omega^2, \quad (9.8)$$

где k_1 — коэффициент пропорциональности.

Тогда

$$N = \frac{1+\varepsilon}{2\eta_{\text{к.г.}}} k_1 \rho_0 V^3 \Omega^2, \quad (9.9)$$

Придя особое значение объемному водозмещению V и скорости v , приведем формулу (9.9) к виду

$$N = \frac{V^{2/3} v^3}{C_d}, \quad (9.10)$$

где C_d — так называемый адмиралтейский коэффициент.

Эту формулу называют формулой адмиралтейских коэффициентов, или адмиралтейской, причем вместо V в ней обычно фигурирует водозмещение D . В этом случае формула (9.10) имеет общепринятый вид

$$N = \frac{D^{2/3} v^3}{C_d}.$$

В этой формуле в течение многих лет N измерялся в лошадиных силах; D — в тоннах соли; v — в узлах. Следует отметить, что тонна D и N принимались в английской системе мер (1 т = 1016 кг, 1 л. с. = 74,6 кг·м/с, а тонна в метрической системе (1 т = 1000 кг; 1 л. с. = 75 кг·м/с). Ввиду неясной точности последней формулы при ее использовании на систем мер принята обычно не обращалась.

Для расчетов по формуле (9.10) применяем систему СИ и используем следующие единицы: для N — ватт; для V — кубические метры; для v — метры в секунду.

Коэффициент

$$C_d = \frac{2\eta_{\text{к.г.}}}{(1+\varepsilon)k_1 \rho_0 V^{1/3}}. \quad (9.11)$$

Влияние величин, входящих в формулу (9.11), на адмиралтейский коэффициент C_d многообразно. Значение плотности воды ρ_0 колеблется очень мало. Несколько больше колеблется коэффициент k_1 , входящий в формулу (9.8) (см. 9.3). При достаточной обработке выступающих частей величина k_1 близка к постоянной. Общ. КПД $\eta_{\text{к.г.}}$ в пределах одной скоростной группы при хорошей обработке характеристик двигателя и обшивке корабля тоже приближается к постоянной величине.

Основная причина изменения C_d — изменение величин ζ и l . Первая из этих величин зависит от скорости судна, формы и размеров погруженной части корпуса, а также от величины l .

Применяя формулу (9.10), нужно иметь в виду, что по ней можно определять мощность ЭУ одного и того же судна заданных размеров при разных скоростях, необходимую для построения кривой $N = f(v)$ (в этом случае будут меняться, главным образом, коэффициенты $\eta_{\text{к.г.}}$ и ζ), и мощность ЭУ проектируемого судна при расчетной скорости (скорость на испытании, скорость эксплуатационная); при этом на ζ , а следовательно и на результат, должны влиять изменения и процесса проектирования формы и размеров судна, в частности изменения l .

Если рассмотреть ряд водозмещающих судов, от тихоходных до быстроходных ($Fr = 0,10$ — $0,60$), то адмиралтейские коэффициенты для них при расчетных скоростях будут изменяться соответственно от 100 до 25. Проектант, естественно, заинтересован в увеличении адмиралтейского коэффициента. Значительные колебания коэффициента C_d характерны как для расчетной скорости разных судов так и для одной скорости одного и того же судна.

Довольно широко применялся график перебора C_d без изменений с прототипа на проект приводила к значительным погрешностям в том случае, если скорость проекта и прототипа была

различной. Известны предложения А. В. Бронникова [25] и В. А. Лескиным [53] способы пересчета величины C_{21} при переходе от прототипа к проекту. Ниже предлагается и несколько измененном виде путь, предложенный В. А. Лескиным.

Сравнивая адмиралтейские коэффициенты для проекта и прототипа по формуле (9.11), можно получить

$$\frac{C_{21}}{C_{210}} = \frac{\eta_{21}}{\eta_{210}} \frac{\lambda_{21}}{\lambda_{210}} \frac{1+c_1}{1+c_{10}} \frac{\rho_1}{\rho_{10}} \left(\frac{L}{L_0}\right)^{1/2} \frac{L_0}{L} \quad (9.12)$$

Считая ряд величин, входящих в выражение (9.12), практически постоянным, имеем

$$\frac{C_{21}}{C_{210}} = \frac{\eta_{21}}{\eta_{210}} \left(\frac{L}{L_0}\right)^{1/2} \frac{L_0}{L}$$

Так как

$$\frac{\eta_{21}}{\eta_{210}} = \frac{\eta_{210}}{\eta_{210}} \frac{\eta_{21}}{\eta_{210}}$$

а, по В. А. Лескину,

$$\frac{\eta_{21}}{\eta_{210}} = 1 - k_k \left(\frac{n}{n_0} - 1\right),$$

где $k_k = 0,16$ — для морских судов (винты без насадок), а n_1 и n_0 — частота вращения главного двигателя проекта и прототипа соответственно, то

$$\frac{C_{21}}{C_{210}} = \frac{\eta_{210}}{\eta_{210}} \left[1 - k_k \left(\frac{n}{n_0} - 1\right)\right] \left(\frac{L}{L_0}\right)^{1/2} \frac{L_0}{L} \quad (9.13)$$

В. А. Лескиня предлагает коэффициент C_{21} для проекта принять равным коэффициенту C_{210} для прототипа, но при скорости, заданной в проекте v_1 , что, до некоторой степени, позволит получить известный запас мощности (если переходить к судам больших размеров). Отношение L_0/L может быть принято по данным 9.9. Частота вращения двигателя учитывается по предлагаемому к установке типу двигателя. Коэффициент полезного действия передатки тоже берется по назначенной передаче.

В результате получается новый адмиралтейский коэффициент C_{21} , а большой мере соответствующий данному проекту, чем коэффициент C_{210} прототипа.

9.4. Определение мощности энергетической установки по двухкомпонентным формулам в функции D и v

При невозможности размерений и формы судна увеличение его скорости осложняется из-за влияния так называемой критической скорости, которая является практически предельной (см. 9.5). Для повышения скорости приходится изменять форму и размеры судна даже при постоянном водоизмещении, т. е. влиять на такие характеристики, как относительная длина L и коэффициент

общей полноты δ , а через них и на коэффициент сопротивления Z .

Для оценки изменения мощности при изменении скорости отдельного судна (при неизменных его размерах и форме) формула адмиралтейских коэффициентов с постоянным C_{21} не позволит получить правильного ответа.

Недостатком адмиралтейского коэффициента привлекло внимание ряда судостроителей и заставило их искать другие формулы, имеющие более стабильные коэффициенты, мало зависящие от водоизмещения и скорости.

Общее выражение для формулы, определяющей мощность ЭУ N при данном водоизмещении и данной расчетной скорости, основывалось на выражении, сложенном с формулой (9.10), но с измененными показателями степени m и n при V и v . Показатели степени выбирались таким образом, чтобы стабилизировать значение коэффициента C_{210} :

$$N = \frac{V^m v^n}{C_{210}} \quad (9.14)$$

или

$$N = \frac{D^m v^n}{C_{210}} \quad (9.15)$$

В. В. Давыдов, используя информацию по 50 судам объемным водоизмещением от 2100 до 5800 м³ и скоростью от 9,8 до 23,5 уз (от 5 до 12 м/с), получил формулу (по способу наименьших квадратов)

$$N = \frac{D^{0,8} v^{2,10}}{C_{210}}$$

Чтобы сделать более удобным расчет по ней, автор несколько изменил значения m и n и привел ее к виду

$$N = \frac{V^{0,5} v^{2,25}}{C_{210}} \quad (9.16)$$

в которой N — в киловаттах; V — в кубических метрах; v — в узлах; $C_{210} = 150 \pm 10$.

Кроме указанных формул известна формула того же типа, предложенная Эвсли:

$$N = \frac{V^{0,5} v^2}{C_{210}} \quad (9.17)$$

Известна формула В. И. Афанасьева

$$N = 1000 \left(\frac{D^{1/3}}{L^2}\right)^{1/2} \left(\frac{v}{A}\right)^{1/2}$$

тоже может быть приведена к виду (9.14):

$$N = \frac{V^{0,5} v^{0,5}}{C_{210}} \quad (9.18)$$

В этих формулах $A = 29,5$; $C_{\text{max}} = 110 (\delta^{0,45} / \delta_0^{0,5})$; σ — в узлах; N — в киловаттах.

Формулы В. И. Афанасьева (преобразованная), В. В. Давыдова, Эгистан выражают общую тенденцию уменьшения показателя степени при водовозмущении по сравнению с адмиральтейской формулой (9.10).

При использовании формул типа (9.14) следует ясно представлять цель, для которой формула назначена.

Возможны два характерных случая:



Рис. 9.1. Зависимость мощности от скорости при известных форме и соотношениях размеров судна. 1, 2, 3 — для трех типов судов канальной формы с обтекаемыми водовозмущателями; 4 — для проектируемого судна с обтекаемой формой.

1. Рассматривается зависимость $N(v)$ для неизменной модели с постоянными главными размерениями и коэффициентом формы, постоянным пропульсивным оборудованием (ЭУ, анкирети), но с увеличивающейся скоростью. Это возможно, например, когда ЭУ построенного судна развивает последовательно ряд мощностей. Кривая $N(v)$ для такого судна поднимается с увеличением скорости все круче и круче — растет ее угловой коэффициент dN/dv . Этот рост обычно ограничивается критической скоростью (см. 9.5), с которой связаны расчетные скорости — скорости рассматриваемого судна на испытаниях и его эксплуатационная скорость. Если применить к этому случаю адмиральтейскую формулу (9.10), то коэффициент C_0 в ней будет увеличиваться с увеличением скорости. Проверками таких зависимостей являются показанные на рис. 9.1.

2. Рассматривается зависимость $N(v)$ для модели, изменяемой в процессе проектирования. В зависимости от назначаемой расчетной скорости будут изменяться главные размерения и форма модели, в целях ограничения роста мощности при увеличении скорости. Регулируется рост мощности $N(v)$ со скоростью в основном

путем назначения величин относительной длины l (в функции от скорости) и коэффициента полноты δ (в функции от числа Фруда Fr , т. е. в конечном счете тоже от скорости).

Кривая 4 на рис. 9.1 соответствует рассматриваемому случаю и более полого, чем кривые 1, 2 и 3. Естественно, что показатель степени n при v может быть здесь назначен меньше, чем в первом случае.

Не следует забывать, что этот показатель n будет зависеть от назначаемых величин l и δ . В случае необходимости осуществления больших скоростей и ограничений возможностей по уменьшению δ и увеличению l приходится принимать более высокую степень n .

Формулы, соответствующие кривой 4, пригодны для статистической обработки группы судов, относительно которых можно предположить, что для них выбирались l и δ , соответствующие их скорости. При подготовке таких формул желательно удерживать коэффициент C_{max} от большой изменчивости.

При рассмотрении судов разных исторических периодов, назначения и скоростных групп могут получаться разные законы $N(v)$.

Как показано обследованием большой группы транспортных судов (около 1000 единиц), построенных во второй половине XX в. (после 1950 г.), наиболее точные результаты дала формула [20]

$$N = \frac{1,61,22}{C_{\text{max}}}, \quad (9.19)$$

где Y — в кубических метрах; N — в киловаттах; C_{max} дается с учетом среднеквадратичных отклонений: $C_{\text{max}} = 27,2 \pm 2,7$ при σ в узлах; $C_{\text{max}} = 5,17 \pm 0,54$ при σ в метрах в секунду.

Для промышленных судов Нгуен-Куанг-Вьен получили [61] $C_{\text{max}} = 25,3 \pm 2,9$ при σ в узлах; $C_{\text{max}} = 4,79 \pm 0,55$ при σ в метрах в секунду.

Для судов смешанного плавания Данг-Хыу-Фу получили [40]: $C_{\text{max}} = 22,0 \pm 1,8$ при σ в узлах; $C_{\text{max}} = 4,18 \pm 0,25$ при σ в метрах в секунду.

Для судов с $Fr \geq 0,3$ следует применять формулу Эгистан (9.17), где, по А. И. Гайманчу и Н. В. Челпанову, $C_{\text{max}} = 58,2 \pm 13,4$ при σ в узлах; $C_{\text{max}} = 7,8 \pm 1,8$ при σ в метрах в секунду.

Получно отметить, что для этой группы судов приемлемые результаты может дать и адмиральтейская формула (9.10).

При использовании формул (9.17) для определения D (см. 3.5) следует правильно принимать коэффициенты C_{max} . Чем больше возможностей для обработки обшивки, тем большими можно принимать коэффициенты C_{max} . При необходимости создания некоторого запаса мощности надо вычитать из среднего значения C_{max} среднее квадратичное отклонение, абсолютное значение которого было бы не больше указанного в формуле.

9.3. Анализ кривых мощности и сопротивления.
Критическая скорость

Исследование кривой $N(v)$, а также кривых сопротивления $R(v)$ (рис. 9.2 и 9.3) дает основание для суждения о предельной скорости для данного судна. Построение указанных кривых возможно только для судна, теоретического чертежа которого уже построено (или, по крайней мере, определены все его характеристики) и известны характеристики взаимодействия системы двигатель—двигатель—корпус судна. Эти кривые так или иначе являются

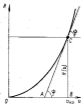


Рис. 9.2. Схема определения критической скорости по Г. Е. Павленко.

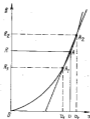


Рис. 9.3. К определению критической скорости способом равных углов.

результатом модельных испытаний: либо испытаний модели, выполненной по данному теоретическому чертежу, либо испытаний серии моделей, в которой можно найти модель с характеристиками, более или менее соответствующими характеристикам проектируемого судна.

Испытания и расчеты двигателя и сведения о взаимодействии двигателя и судна вместе с данными об ЭУ позволяют построить кривые мощности ЭУ в функции скорости $N(v)$. Кривые $N(v)$ могут быть построены и по результатам натурных испытаний судна-прототипа. Скорость в последнем случае определяется весьма точно, мощность — менее точно.

Зная зависимость $\zeta(v)$ от числа Фруда или от скорости, можно записать

$$\zeta(v) = k_1 v^x. \quad (9.20)$$

Учитывая это, по формуле (9.2) можно получить:

а) сопротивление голого корпуса

$$R_T = k_1 \frac{R_0 v^{2+x}}{2} \Omega = k_2 v^{2+x}; \quad (9.21)$$

б) сопротивление корпуса с выступающими частями

$$R = k_2 (1 + \epsilon) v^{2+x} = k_3 v^{2+x}; \quad (9.22)$$

в) буксировочную мощность

$$N_S = Rv = k_4 v^{3+x}; \quad (9.23)$$

г) потребляемую мощность ЭУ*

$$N = N_S / \eta_b = k_5 v^{3+x}. \quad (9.24)$$

В этих формулах k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 — коэффициенты пропорциональности.

Показатель степени при v для кривых, построенных по формулам (9.21) — (9.24), фактически растет с увеличением скорости. Этот показатель может служить критерием применимости данного теоретического чертежа (формы судна) и его характеристика в проекте. Если построить кривые по формулам (9.21) — (9.24), то на них можно указать точки, соответствующие скорости на испытании и так называемой критической скорости. Под критической скоростью $v_{кр}$ понимается скорость, после достижения которой сопротивление начинает особенно быстро расти. Поэтому показатель степени при v , а следовательно, и его значение x на данном участке кривой достигают предельных значений.

Некоторые авторы считают [63], что сопротивление в критической точке должно быть пропорционально третьей степени v . Таким образом, здесь $x = 2 + x = 3$ и $x = 1$.

Скорость на испытании, как правило, берется несколько меньше критической, причем по Л. М. Ногуду [63], разность между $v_{кр}$ и v равна 0,5 уз для острых бесхозных судов. Ввиду близости $v_{кр}$ и v можно предположить, что сопротивление на испытании тоже пропорционально третьей степени v .

Существует ряд способов определения критической скорости и показателя степени при v по кривым $N(v)$ и $R(v)$.

Г. Е. Павленко предложил способ определения показателя степени $(2 + x) = n$, который рассмотрим здесь на примере анализа кривой $R(v)$, хотя таким же образом можно проанализировать и кривую $N(v)$.

Проведя касательную к кривой $R(v)$ (см. рис. 9.2) в интересующей нас точке (например, в критической), получим

$$\tan \phi = \frac{dR(v)}{dv} = \frac{d(k_2 v^{2+x})}{dv} = n \frac{R(v)}{v}.$$

* Здесь предполагаем, что η_b не зависит от v , а это не совсем точно.

Отрезок \overline{AB} можно определить из $\triangle ABC$:

$$\overline{AB} = \frac{R(\psi)}{\lg \psi} = \frac{\alpha}{x}$$

Откуда

$$n = \alpha \overline{AB} \text{ и } x = (\alpha \overline{BA}) - 2.$$

Величину n , соответствующую v_{cr} , обозначим n_{cr} .

Можно и другим способом определить n . Для этого следует провести секущую, которая при сближении точек A_1 и A_2 в пределе

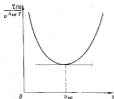


Рис. 9.4. К определению критической скорости по Л. М. Ногуду.

обращается в касательную (см. рис. 9.3). Точка A_1 соответствует скорости $v_1 = v - \Delta v$, точка A_2 — скорости $v_2 = v + \Delta v$. Тогда

$$n = \frac{\lg R_2 - \lg R_1}{\lg v_2 - \lg v_1}.$$

Существуют и другие способы определения n . Например, Л. М. Ногуд [63] предложил способ определения критической точки при помощи исследования кривой $\xi(v)/v^{4.59-2}$ на минимум (рис. 9.4).

9.6. Эксплуатационная скорость. Запас мощности. Коэффициент использования скорости

Эксплуатационную скорость для транспортных судов можно рассматривать как среднюю из скоростей во время всех рейсов судна за год. Для судов, работающих на определенных линиях, вводит близкое понятие «вдвухвойной скорости».

Сдвухвойная скорость — это скорость, которую должно поддерживать судно на данной линии, а эксплуатационная — это скорость, которую может иметь судно в зависимости от состояния его корпуса, энергетической установки и метеорологических усло-

вий на данной линии. Точка, соответствующая мощности при эксплуатационной скорости, не может быть найдена на кривых, построенных по формулам (9.22) и (9.23), так как одной из причин уменьшения скорости при эксплуатации является увеличение сопротивления от обрешетки корпуса, волнения моря и ветра, что приводит к изменению зависимостей $N(v)$, $R(v)$, $\xi(v)$.

Разница между скоростью на испытании при полной номинальной мощности и эксплуатационной скоростью объясняется не только изменением сопротивления, но и различием в квалификации машинной команды, эксплуатирующей судно, и слаточной машинной команды, что влияет на мощность, развиваемую двигателем, а следовательно, на эксплуатационную скорость судна.

В США и некоторых других странах эксплуатационную скорость судна определяют по результатам ходовых испытаний при мощности ΣN , пониженной на величину ΔN , которая колеблется от 0,2 до 0,35 полной двигательной мощности ΣN . Максимальное значение ΔN характерно, в частности, для быстрозвожженных грузовых лайнеров японской постройки. Так как точка, соответствующая эксплуатационной скорости v_{exp} при пониженной мощности, может быть найдена на кривой $N(v)$, можно считать скорость на испытании при полной мощности (скорость на испытании v) с этой скоростью.

Коэффициент использования скорости, получаемой на испытаниях, который называют просто коэффициентом использования скорости, $\eta_v = v_{exp}/v$.

Учитывая, что мощность относится как соответствующие скорости в степени $3 + x = n + 1$ (см. 9.5), получаем

$$\frac{N_{exp}}{N} = \frac{N - \Delta N}{N} = \left(\frac{v_{exp}}{v} \right)^{n+1},$$

откуда

$$\eta_v = \frac{v_{exp}}{v} = \left(\frac{N - \Delta N}{N} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (9.25)$$

или после упрощения

$$\eta_v = 1 - \frac{1}{n+1} \frac{\Delta N}{N}. \quad (9.26)$$

Отношение $\Delta N/N$ называется *запасом мощности*.

Результаты подсчета $\eta_v = f(n, \Delta N/N)$ по более точной формуле (9.25) приведены в табл. 9.1.

Из табл. 9.1 видно, что наибольшие запасы мощности соответствуют коэффициенту использования скорости $\eta_v = 0,87 \div 0,92$, а наименьшие $\eta_v = 0,95 \div 0,97$. Если взять $x = 1$, а $n + 1 = 3 + x = 4$, то колебания η_v ограничатся диапазоном 0,90—0,95. Принимая такие цифры, можно назвать эксплуатационную скорость, на 4—10 % меньшую скорости на испытании.

n=1	Значения η_p при $\Delta V/V$				
	0,05	0,20	0,35	0,50	0,65
5	0,918	0,932	0,944	0,956	0,968
4	0,897	0,913	0,926	0,940	0,950
3	0,885	0,892	0,907	0,928	0,946

9.7. Общие графические характеристики формы судна. Теоретический чертеж и строевая. Строевая по шпангоутам

Выше влияние размеров судна на его ходкость характеризовалось в основном величинами водоизмещения и смоченной поверхности. Упомянутые выше гидродинамические характеристики судна — число Фруда и число Рейнольдса — также были связаны с размерами судна (через его длину). Однако связь ходкости судна с его размерами и формой значительно сложнее. На коэффициент ζ , входящий в формулы сопротивления и мощности, кроме скорости влияют соотношения размеров судна, коэффициенты полноты и другие характеристики формы его корпуса.

Теоретический чертеж судна является наиболее общей графической характеристикой формы судна. По этому чертежу может быть изготовлена модель, испытания которой в опытовом бассейне даст возможность рассчитать ее сопротивление, а затем путем пересчета на натурное судно получить сопротивление голого корпуса.

Специальные самоходные испытания модели или использование систематизированных результатов экспериментов по гребным винтам и взаимодействию их с корпусом судна дают возможность определить полное сопротивление судна с установленными частями и необходимую мощность его ЭУ.

Другими графическими характеристиками формы корпуса судна являются строевая по шпангоутам и строевая по ватерлиниям. Обе эти кривые основываются на теоретическом чертеже. Строевая по ватерлиниям характеризует распределение объема судна по вертикали, а строевая по шпангоутам — по горизонтали, т. е. по длине судна. Кроме того, строевые отражают ряд особенностей теоретического чертежа, связанных с ходкостью.

Площадь, заключенная между горизонтальной осью и ободом строевой по шпангоутам, дает объемное водоизмещение судна V , ординаты — площади шпангоутов S_n , а максимальная ордината — площадь наибольшего шпангоута S_{max} . Длина основания строевой равна длине судна L , положение ЦТ площади строевой по длине характеризуется его абсциссой ЦВ x_c , а положение по оси x

шпангоута наибольшего сечения совпадает с максимумом строевой. Коэффициент полноты строевой по шпангоутам равен коэффициенту продольной остроты τ . Строевая как упругое графическое изображение теоретического чертежа содержит важные для характеристики ходкости величины (L , τ , x_c , S_{max}) и имеет большое значение при ее оценке.

Строевую по шпангоутам часто заменяют кривой средних ординат ватерлиний, которую называют также средней ватерлинией. Ее важным свойством является то, что ее ординаты — линейные величины. Ординаты этой кривой являются результатом деления ординат строевой по шпангоутам на удвоенную осадку:

$$y_{cp} = S_p/2T. \quad (9.27)$$

Площадь

$$S_c = \int_{z_{min}}^{z_{max}} y_{cp} dz, \quad (9.28)$$

ординаты средней ватерлинии y_{cp} являются средними ординатами всех ватерлиний на данном шпангоуте. Средняя ватерлиния, так же как и строевая по шпангоутам, имеет сходство с ватерлинией дельного судна, что объясняется вращением этих кривых и отражается в формулах (9.27) и (9.28). Длина основания средней ватерлинии, естественно, совпадает с длиной судна (расчетной). Положение ЦТ ее площади и положение шпангоута наибольшего сечения остаются такими же, как и у строевой по шпангоутам. Наибольшая ордината кривой $y_{cp,max} = S_{max}/2T = \beta\delta/2$, коэффициент полноты остается равным τ .

В качестве дополнительной характеристики формы корпуса при решении вопроса ходкости используется грузовой (или конструктивный) ВЛ, а иногда и шпангоут наибольшего сечения.

Изменением формы строевой по шпангоутам и грузовой ватерлинии можно оказывать влияние на сопротивление воды движению судна, а следовательно, и на мощность ЭУ, требующуюся для достижения нужной скорости. Эти изменения достигаются прежде всего изменением L .

9.8. О смоченной поверхности судна. Строевая по ватерлиниям

Смоченная поверхность Ω , имеет большое значение для ходкости судна, учитывается при расчетах потребной мощности ЭУ (см. 9.2).

Так как наибольшая кривизна ватерлиний судов, рассматриваемых в этом курсе и характеризующихся $\Gamma = L/\sqrt{V} > 4,5$ или $t_n = -(L/B) > 5,5$ малая, смоченная поверхность может быть определена как

$$\Omega = 2 \int_{-x/2}^{x/2} g dx, \quad (9.29)$$

где g_1 — длина полуэллипса обода погруженной части шлангоу-
тов. Формулу (9.29) можно заменить выражением

$$\Omega = 2Lg_2, \quad (9.30)$$

где g_2 — средний погруженный полуэллипс обода шлангоутов:

$$g_2 = \int_{a=0}^{a=c} g_1 ds/L.$$

Этот средний полуэллипс может быть получен приближенно (но с высокой степенью точности) как полуэллипс шлангоута средней площади, получаемого из строимой по заданным делениям ее ординат на $2L$ (см. 6.3).



Рис. 9.5. Приближенное построение шлангоута средней площади по Мюррау.

Если за основу принять строимую по ватерлинии, аэтику Мор-
ризом (см. 6.8) для вылова выражения аппликации ЦВ (см. 6.7),
то соответствующий шлангоут будет иметь вид, представленный
на рис. 9.5. Пользуясь этим рисунком, можно вычислить

$$g_{cp} = GM + ME = \frac{1}{2} \delta B A_B + \frac{\delta}{\alpha} T A_T, \quad (9.31)$$

$$A_B = \sqrt{1 + 4 \left(\frac{T}{B} \right)^2 \left(\frac{\alpha - \delta}{\alpha \delta} \right)^2};$$

$$A_T = \sqrt{1 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta}{T} \right)^2 \left(\frac{\alpha}{\delta} \right)^2 (\alpha - \delta)^2}.$$

Расчет g_2 по формуле (9.31) дает практически точный резуль-
тат. Несмотря на сложность формулы то, что коэффициенты A_B и A_T
являются радикалами, а также наличие в ней не только коэффи-
циента общей полноты δ , но и стоящего выше в иерархии характе-
ристик формы коэффициента α . Поэтому в нее имеет смысл внести
упрощения. Заменяя α на приближенную величину $\delta^{0.7}$ (см. 6.6)
и учитывая, что вторые члены под радикалами при различных

реальных значений $\delta_T = B/T$ относительно малы, получаем

$$A_B \approx 1 + \frac{2}{\delta_T^2} \left(\frac{1}{\delta} - \frac{1}{\alpha} \right)^2 \approx 1 + \frac{2}{\delta_T^2} \left(\frac{1}{\delta} - \frac{1}{\delta^{1.2}} \right)^2;$$

$$A_T \approx 1 + \frac{\delta_T^2}{8} (1 - \delta_T)^2.$$

Выражение для площади полной смоченной поверхности на
основании формул (9.30) и (9.31) будет следующим:

$$\Omega = \left(A_B \delta B + 2 A_T \frac{\delta}{\alpha} T \right) L. \quad (9.32)$$

При $\delta_T = 2+3$, т. е. для большинства транспортных (главным
образом, грузовых) судов и при относительно больших δ второй
член в выражении для A_B делается малым по сравнению с 1. При
этих же условиях произведение $2 A_T (\delta/\alpha) \approx 2 A_T \delta^{0.7}$ приближается
к среднему значению 1,7. В этом случае формула (9.32) может быть
заменена известной формулой Мюррау, полученной статистиче-
ским путем,

$$\Omega = L (\delta B + 1,7T). \quad (9.33)$$

При малых $\delta = (0,45+0,50)$ и при $\delta_T = 2,5+3,5$ вторые члены
в формулах для коэффициентов A_B и A_T начинают увеличиваться;
в то же время величина $\delta/\alpha \approx \delta^{0.2}$ сравнительно мала. В этом слу-
чае формула (9.32) приближается к формуле С. П. Мурагина, также
полученной статистическим путем:

$$\Omega = L (1,138\delta B + 1,36T). \quad (9.34)$$

Формулы (9.33) и (9.34) пригодны только для ограниченного
диапазона значений δ и δ_T , что известно как из опыта их приме-
нения, так и из анализа более общих формул (9.31) и (9.32).

Известная формула Тейлора может быть связана также со смочен-
ным шлангоутом средней площади. Площадь его на один борт
равна $(\delta BT)/2$. Заменяя шлангоут средней площади равноэквивалент
по площади квадрантом круга, получаем радиус круга

$$r = \sqrt{\frac{3}{\pi} \delta BT}$$

и смоченный полуэллипс шлангоута средней площади

$$g_{cp} = \sqrt{\frac{\pi}{2} \delta BT},$$

что позволяет найти площадь смоченной поверхности

$$\Omega = 2g_{cp}L = \sqrt{2\pi} \sqrt{L\delta BT} = k_T \sqrt{VL}, \quad (9.35)$$

где $k_T = \sqrt{2\pi} = 2,52$ (для круговых обводов).

Так как круговые обводы дают наименьшую смоченную поверх-
ность при прочих равных условиях, то практически всегда $k_T > 2,52$.

Тейлор определил k_T как функцию δ и b_T , причем, по его данным,

$$k_T = 2,66 \pm 0,11. \quad (9.36)$$

Отношения площади смоченной поверхности и приближенной величины площади диаметральной плоскости LT по разным формулам получаются довольно близкими и являются функцией δb_T . По Тейлору,

$$\Omega/LT = k_T \sqrt{\delta b_T};$$

по Мумфорду,

$$\Omega/LT = \delta b_T + 1,7;$$

по Мурагу,у,

$$\Omega/LT = 1,13\delta b_T + 1,26.$$

Формулы площади смоченной поверхности типа $L(m\delta + nT)$ дают лучшие результаты, чем формула Тейлора $\Omega = k_T \sqrt{LV}$. Для улучшения результатов, получаемых по формуле Тейлора, необходимо изменить k_T в зависимости от b_T и коэффициента волноты судна. В некоторых случаях формула Тейлора позволяет осуществлять удобные преобразования, например учитывать влияние относительной длины на смоченную поверхность, поскольку

$$\Omega = k_T \sqrt{VL} = k_T V^{2/3} \left(\frac{L}{V} \right)^{1/2} = k_T V^{2/3} l^{1/2}. \quad (9.37)$$

Приращение площади смоченной поверхности при малых изменениях δ , L , V , T может быть выражено так:

$$\Delta\Omega \approx \frac{\partial\Omega}{\partial\delta} \Delta\delta + \frac{\partial\Omega}{\partial L} \Delta L + \frac{\partial\Omega}{\partial V} \Delta V + \frac{\partial\Omega}{\partial T} \Delta T. \quad (9.38)$$

Вот, например, за основу формулу Мумфорда, запишем выражение (9.38):

$$\Omega = LB\delta\delta + (\delta\delta + 1,7T) \Delta L + \delta L\Delta V + 1,7L\Delta T. \quad (9.39)$$

Отсюда

$$\Delta\Omega = \frac{\Omega}{1 + (1,7\delta b_T)} \frac{\Delta\delta}{\delta} + \Omega \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Omega}{1 + (1,7\delta b_T)} \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Omega}{1 + (\delta b_T/1,7)} \frac{\Delta T}{T}$$

или

$$\frac{\Delta\Omega}{\Omega} = \frac{\Delta\delta}{1 + (1,7\delta b_T)} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta V/V}{1 + (1,7\delta b_T)} + \frac{\Delta T/T}{1 + (\delta b_T/1,7)}$$

Следовательно, при изменении $\Delta L/L$ увеличение площади смоченной поверхности в $[1 + (1,7\delta b_T)]$ раз больше, чем при том же изменении $\Delta\delta/\delta$ или $\Delta V/V$, и в $[1 + (\delta b_T/1,7)]$ раз больше, чем при изменении $\Delta T/T$.

Таким образом, для тихоходных судов, у которых основную часть сопротивления составляет сопротивление трения, физическое связное со смоченной поверхностью, выгодно в случае необходимости увеличения водозмещения ограничивать рост $\Delta L/L$ путем увеличения $\Delta\delta/\delta$ или $\Delta V/V$. При малых δ и b_T может оказаться необходимым увеличивать $\Delta T/T$. При $b_T = 1,7/\delta$ относительное изменение V и T влияет на изменение Ω одинаково. При $b_T = 1,7/\delta$ и фиксированном значении L смоченная поверхность становится минимальной [54].

Выше рассматривались свойства обобщенной характеристики формы судна — строевой по материалу и получаемого из нее среднего шпангоута. Не следует забывать, что строевая по материалу, позволяя установить распределение объема судна по вертикали, оказывает также большое влияние на жесткость, плавучесть и остойчивость, что должно учитываться при решении практических задач (см. гл. 5, 6 и 8).

9.9. Связь длины судна с ходкостью. Относительная длина

Выше отмечалось, что смоченная поверхность растет прямо пропорционально длине судна. Шарпа, осадка и коэффициент обшей полноты влияют на смоченную поверхность в меньшей степени. Поэтому тихоходные суда, у которых основную часть сопротивления движению составляет сопротивление трения, пропорциональное смоченной поверхности, должны проектироваться с учетом мер по ограничению их длины, что благоприятно складывается и на уменьшение массы металлического корпуса.

Длина тихоходного судна может быть уменьшена, в частности, путем увеличения коэффициентов δ и φ . Однако уменьшению длины препятствует необходимость борьбы с другим компонентом вязкостного сопротивления — сопротивлением формы R_{ϕ} (вихревым сопротивлением). При уменьшении длины L строевая по шпангоуту приобретает ту же овертаня и смоченность, и в частности в корме. Эти тулые овертаня могут вызвать огрыз постраившего слоя и вихреобразование в кормовой части, что способствует увеличению сопротивления формы.

С увеличением скорости, а следовательно, и числа Фруда, особенно интенсивно растет вязкое сопротивление. Поскольку число Фруда обратно пропорционально $L^{3/2}$, то для снижения волнового сопротивления выгодно увеличивать L . Для сохранения постоянства числа Фруда с возрастанием скорости необходимо было бы увеличивать длину

$$Fr = \frac{v_1}{\sqrt{gL_1}} = \frac{v_2}{\sqrt{gL_2}}$$

т. е. $L_2/L_1 = (v_2/v_1)^2$.

Отсюда видно, что увеличение скорости на 40 % потребовало бы увеличения длины приблизительно в 2 раза.

Можно показать практическую невозможность решения такой задачи на примере судна постоянного водоизмещения, особенно если учесть влияние длины на нагрузку по корпусу и на другие размеры корпуса судна [187].

Если обратиться к строной по шпангоутам (к средней водерлинии), можно увидеть, что с увеличением L и при определенном V она будет заостряться. Обычно же изменение длины судна сопровождается изменением его водоизмещения, пропорционального площади строной. Поэтому известную характеристику заострения водерлиний судна даст относительная длина, выражаемая через L и V : $l = -L\sqrt[3]{V}$.

В практике США и Англии часто применяется величина, обратная относительной длине: относительное водоизмещение.

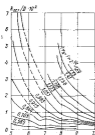


Рис. 9.6. Зависимость относительной длины от относительного водоизмещения.

Обычно вместо V фигурирует D , что делает безразмерную величину l размерной и зависящей от единиц измерения L и D . На это надо обращать внимание при использовании зарубежных данных.

Напомним, что по формуле (4.2) относительная длина

$$l = \frac{L^2}{D^3} (\rho_1 \lambda k)^{1/3}.$$

Отсюда видно, что на величину l влияют такие характеристики полноты и остроты судна, как отношение длины к ширине, шарниры к осадке и, наконец, коэффициент общей полноты.

В. Л. Подкопин говорит, что каждая из этих характеристик и отдельная не дает полного представления об остроте судна, а то время как относительная длина l характеризует эту остроту и поэтому должна использоваться при оценке ходкости судна.

В начале XX в. были сделаны попытки установить связь между относительной длиной и ходкостью катерами судна. Ш. Дувер показал влияние увеличения l на уменьшение удельного остаточного сопротивления $R_{\text{ост}}/D$ (рис. 9.6).

Эвр (Ауге) предложил зависимость среднего значения относительной длины l от относительной скорости (от числа Фруда Fr) при изменении ее в пределах 0,12—0,30: $l = 3,34 + 10,25 (v/\sqrt{gL})$.

Отсюда В. Л. Подкопин [73] получил

$$L^{1,2} = 3,34 v^{1,2} L^{1,2} - 3,27 v^{1,5} = 0. \quad (9.40)$$

Задав объемное водоизмещение V и скорость v из формулы (9.40), можно получить L и, следовательно, l .

В. Л. Подкопин, получив зависимость между L , V и v в виде (9.40), решил определить среднюю статистическую длину гражданских судов в функции величин V и V .

Обследовав 300 гражданских судов самых разнообразных типов водоизмещением от 1000 до 42 000 м³ и скоростью от 8 до 20 уз, он получил формулу, характеризующую зависимость средней статистической L от скорости и водоизмещения:

$$L = c \left(\frac{v}{v+2} \right)^2 V^{1/3}, \quad (9.41)$$

где $c = 7,2$.

Из (9.41) получаем

$$l = \frac{L}{V^{1/3}} = 7,2 \left(\frac{v}{v+2} \right)^2, \quad (9.42)$$

т. е. зависимость относительной длины от скорости и узлах. Эта формула, опубликованная в английском журнале, была широко применена за рубежом. Ее исследование привело сотрудников Батенбургского бассейна (Голландия) к выводу, что коэффициент c должен расти вместе с ростом расчетной скорости и составлять: 7,17 для одновинтовых транспортных судов ($v = 11 \div 16,5$ уз); 7,32 для двухвинтовых транспортных судов ($v = 15,5 \div 18,5$ уз); 7,93 для пассажирских лайнеров ($v > 20$ уз).

Сотрудники этого же бассейна отметили колебания длины в пределах 5 % при одной и той же скорости, что соответствует такому же колебанию c .

Формула (9.42) может быть упрощена:

$$l = 7,2 \frac{v^2}{v^2 + 4v + 4} = 7,2 \frac{v}{v + 4 + (4/v)}.$$

Для нижнего предела скорости ($v = 8$ уз) последний член знаменателя составляет 4 % от его значения, а для верхнего предела ($v = 20$ уз) — не достигает и 1 %. Поэтому этот член может быть опущен. Тогда $l = 7,2 [v/(v+4)]$.

Если же добиться очень близкого совпадения результатов по упрощенной формуле и по формуле (9.42), то надо увеличить последний член знаменателя на 0,3:

$$l = 7,2 \frac{v}{v + 4,3}. \quad (9.43)$$

Анализ формул (9.42) и (9.43) показывает, что они могут быть заменены формулами типа

$$l = c_1 v^a. \quad (9.44)$$

Можно подобрать значения c_1 и n таким образом, что результаты по трем формулам будут практически одинаковы при значении скорости, указанных В. Л. Поздониным (от 8 до 20 уз). Сокращенно формула (9.44) запишется в данном случае так:

$$l = 2,8v^{1,4} \quad (9.45)$$

Результаты вычислений по этим формулам даны в табл. 9.2.

ЗНАЧЕНИЯ l

Таблица 9.2

v, уз	Значения l		
	по (9.45)	по (9.44)	по (9.40)
8	4,60	4,67	4,70
14	5,30	5,30	5,40
20	5,95	5,92	5,91

Незначительные колебания полученных в таблице значений несущественны, потому что рассмотренные формулы дают приближенные значения.

Поскольку степень $n = 1/4$ соответствует постоянному значению коэффициента c_1 в формуле (9.44) (в то же время, в том числе и по данным Ватсонингенского бассейна, этот коэффициент растет с увеличением скорости), в случае применения формул типа (9.41) n должно приниматься более высоким (для сохранения величин c_1 постоянными).

Л. М. Носид предложил формулу

$$l = c_2 v^{1,5} \quad (9.46)$$

где $c_2 = 2,16$ для скоростей $v < 16$ уз.

Ранее в (9.46) для тех же скоростей принималось значение $c_2 = 2,33$, что характерно сейчас для судов с более высокими скоростями (до 24 уз).

Все рассмотренные формулы по определению l дают ее среднее значение (рис. 9.7). При построении кривых 1, 2 и 3 средних значений l в качестве расчетной скорости принята скорость на испытаниях. На рисунке виден сильный разброс точек относительно кривых средних значений l [18].

Зависимость l в широком диапазоне изменения скоростей может быть выражена следующим образом:

$$l = 1,36v^{2,2} \pm \varepsilon \quad \text{или} \quad l = 1,36v^{1,2} \pm \varepsilon_{\max} \quad (9.47)$$

где $\varepsilon = 0,45$ — среднее квадратичное отклонение, а $\varepsilon_{\max} = 1,40$ — наибольшее отклонение.

Эта формула относится к формулам типа (9.44). Как видно по показателю степени $n = 1/2 > 1/4 > 1/4$, она указывает на более резкое, чем это предусматривалось формулами В. Л. Поздонины и

Л. М. Носиды, увеличение l при росте v . Поэтому следует учитывать, что она дает возможность судить о приемлемых значениях l при резких изменениях скорости.

На практике же для установившихся групп судов одинакового назначения рост l идет медленнее с увеличением скорости.

Следует обратить внимание на значительный разброс ($\pm \varepsilon$) значений l при данной скорости v . Этот разброс указывает на важность дополнительного анализа пропульсивных характеристик судна с учетом факторов, которые не отражены в формуле (9.47).

На практике для сухогрузных судов

$$l = 4,47 \pm 0,06v \pm 0,3; \quad (9.48)$$

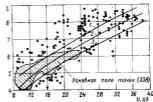


Рис. 9.7. Зависимость относительной длины судна от его скорости.

1, 2 — значения для сухогрузных; 3 — среднее значение.

для пассажирских судов

$$l = 4,62 \pm 0,075v \pm 0,5. \quad (9.49)$$

Для танкеров водоизмещением до 100 000 т связь l со скоростью v (внезапно, на-за малого диапазона изменения скоростей) не обвзвуживается. Для них

$$l = 5,35 \pm 0,4. \quad (9.50)$$

Для танкеров большого водоизмещения характерно уменьшение l с ростом D при одновременном увеличении степени отклонения значений l от их средних значений. При объеме водоизмещения $V = 100\ 000 \text{--} 450\ 000 \text{ м}^3$

$$l = 5,60 - 2,65V \cdot 10^{-6} \pm (0,5 - 1,06V \cdot 10^{-6}). \quad (9.51)$$

В формулы (9.48) — (9.51) введены наибольшие отклонения.

При определении длины судна кроме скорости и водоизмещения должны учитываться и другие характеристики судна, влияющие на разброс значений l (см. 4.1).

На пассажирских судах со спальными местами комфортабельность зависит, в частности, от количества бортовых иллюминаторов, что приводит к необходимости введения отношения числа пассажиров к длине судна $k_L = n_{pas} L / L_s$, которое называется коэффициентом комфортабельности судна [62]. Поэтому при выборе относительной длины судна следует учитывать и показатель комфортабельности. Отсюда видно, что скорость, число пассажиров, водоизмещение и показатель комфортабельности должны быть взаимосвязаны.

Если сложим в формуле (9.49), появляющееся колебание значений l , обозначать через Δl , то

$$l = L \sqrt[3]{V} = 4,62 + 0,075\alpha + \Delta l, \quad (9.52)$$

к тогда можно получить зависимость между требуемыми комфортабельности и ходкости в таком виде

$$L = n_{pas} k_L = (4,62 + 0,075\alpha + \Delta l) V^{1/3}$$

или

$$k_L = \frac{l}{4,62 + 0,075\alpha + \Delta l} \frac{n_{pas}}{V^{1/3}}$$

Придавая Δl значения от $-0,50$ до $+0,50$, можно получить пределы коэффициента комфортабельности с учетом требуемой ходкости при заданных значениях V , α и n_{pas} . Можно установить значение Δl , которое будет соответствовать этим значениям величин k_L , n_{pas} , α и V :

$$\Delta l \approx \frac{n_{pas}}{k_L V^{1/3}} - 4,62 - 0,075\alpha. \quad (9.53)$$

По этой формуле можно судить, насколько комбинация названных выше величин соответствует статистике ($\Delta l = \pm 0,5$).

При назначении длины судна, никаких вооружений (военные корабли), учитывается возможность размещения потребного его количества вдоль диаметральной плоскости при данной длине. После определения длины по формуле (9.47) делают эскиз размещения вооружения и уточняют эскаму длину.

Требования, предъявляемые к размещению оборудования, устройств, пассажирских помещений, в значительной мере объясняют колебания длины судна при неизменных скорости и водоизмещении.

9.10. Заостренность средней ватерлинии. Коэффициенты продольной остроты и общей полноты

Длина судна и коэффициент продольной остроты φ определяют среднюю заостренность стальной по шпангоутам в оконечностях.

Замена средней ватерлинии трапецией (рис. 9.8), ее заострен-

ность в любой оконечности, например, в носовой, можно определить по формуле

$$\lg \varphi_n = \frac{\beta}{4L_n} \frac{\beta}{1 - \varphi_n}, \quad (9.54)$$

где φ_n — коэффициент продольной остроты носовой части средней ватерлинии; L_n — длина носовой части судна (см. 10.4).

Если считать среднюю ватерлинию симметричной относительно середины длины судна, то тангенс угла застрены ее с ДП

$$\lg \varphi = \frac{\beta}{2L} \frac{\beta}{1 - \varphi} = \frac{\beta}{2\beta_n (1 - \varphi)}. \quad (9.55)$$

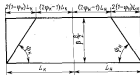


Рис. 9.8. Схема представления средней ватерлинии в форме трапеции.

Эту величину можно рассматривать как меру средней заостренности оконечностей судна.

Из (9.55) видно, что:

коэффициент β увеличивается, увеличивает угол φ , т. е. уменьшает общую заостренность оконечностей судна; коэффициент β действует в том же направлении; отношение $L_n = L/B$ уменьшает φ , следовательно, увеличивает заостренность оконечностей судна.

Общая заостренность судна растет с увеличением скорости и числа Фруда (φ уменьшается). Этот процесс связан с уменьшением β , φ , а также B (см. формулы (6.19) и (6.21)).

Однако процесс уменьшения φ (увеличения заостренности) не беспредель. Он приводит к образованию резки апакса ватерлиний, форма которых неблагоприятно сказывается на ходкости судна, что, в частности, установлено при испытании серии моделей Д. Тейлора. Выше отмечалось, что нижний предел φ (для быстроходных судов) оказывается равным $0,62 \pm 0,07$, прием также φ можно принимать для сравнительно широкого диапазона чисел Фруда (см. 8.4).

На рис. 9.9 показан характер изменения φ для водоизмещающих судов в функции числа Фруда. С возрастанием числа Фруда

Fr от 0,12 до 0,30 происходит постепенное уменьшение φ . Для этого диапазона числа Фруда можно принимать

$$\varphi = 1,05 - 1,5Fr \pm 0,02 \quad (9.56)$$

Л. М. Ногда для Fr = 0,17 ÷ 0,32 предложил формулу

$$\varphi_{0,0} = 0,32Fr^{1,2} \quad (9.57)$$

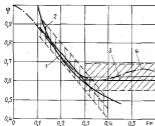


Рис. 9.9. Зависимость φ от числа Фруда, определяемая по различным формулам. 1 — по (9.56); 2 — по (9.57); 3 — по (9.58); 4 — по (9.59).

При φ по этой формуле могут оказаться полезными носовые бульбы. При Fr = 0,29 ÷ 0,60 можно считать

$$\varphi = 0,62 \pm 0,07 \quad (9.58)$$

Здесь $\pm 0,07$ — наибольшее отклонение. В этой зависимости среднее значение β пропорционально среднему значению δ (см. 6.4).

График $\varphi(Fr)$ имеет сильный разброс реально принимаемых значений φ в области значений числа Фруда около 0,30.

Существует формула, которая охватывает число Fr от 0,12 до 0,6, включая область сильного разброса точек:

$$\varphi = 0,9 - 0,6Fr + 0,1 \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{Fr}{0,15}\right) \pm 0,02 \quad (9.59)$$

При $\varphi_{0,0} = 0,62$ значение δ приближается к 0,5. При этом попытка существенно снизить φ приводит к невыгодному решению не только гидродинамическим, но и конструктивным, так как при малых значениях φ и δ получаются такие заострения оконечностей судна, что расположение в них грузовых или других помещений,

обеспечивающих выполнение судном своих функций, становится затруднительным. Известно, что чисто нормальное расположение МО на грузовых лайнерах делается невозможным при δ , приближающемся к 0,56.

Таким образом, условие уменьшения β пропорционально δ является обязательным, и постоянно φ при этом благоприятно сказывается на формировании обводов расположения судна. Статистические данные не противоречат этим соображениям. На рис. 9.10 представлена зависимость $\delta(Fr)$, построенная по данным статистики [19]. Анализ зависимости $\delta(Fr)$ для всей совокупности водоизмещающих судов показывает, что $\delta(Fr)_{\text{т}}$ характеризуется убывающей функцией с горизонтальной асимптотой при $\delta = 1$

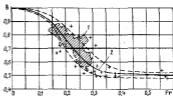


Рис. 9.10. Зависимость коэффициента обшивки δ от числа Фруда. 1 — область, часть использованных значений; 2 — использованные значения, определяемые по формуле (9.60).

и $\delta = 0,5$. В среднем указанного диапазона число Фруда кривая $\delta(Fr)_{\text{т}}$ имеет перегиб.

Поле точек, полученное по данным статистики и давшее основание для построения указанной кривой, расширится в области перегиба (Fr ≈ 0,25). Все поле точек (с учетом их разброса) можно описать выражением

$$\left. \begin{aligned} \delta &= 0,5[1 + \exp(-80 \pm 35)Fr^2] \mp 0,04Fr \\ \text{или} \\ \delta &= 0,5[1 + 2 \cdot 10^{-(80 \pm 35)Fr^2}] \pm 0,04Fr \end{aligned} \right\} \quad (9.60)$$

Коллекция значений δ , получаемых по формулам (9.60), разделяется слагаемым $\pm 35 \mp 0,04 Fr$, причем знак минус в первом случае соответствует знаку плюс во втором. При Fr → 0 $\delta = 1$, что характерно для столбовых судов (лебаркадеры и т. д.). При Fr → 0,6 δ стремится к уровню $(\delta = 0,5 \pm 0,03)$, снижать который не имеет смысла даже для получения гидродинамического

эффекта. Исключением являются спортивные суда, особенно яхты, для которых характерно $\delta \rightarrow 0,12$ при сравнительно низких числах Фруда. Формулы (9.60) следует применять при переходе от одного уровня нагрузки к другому, т. е. при резких ее изменениях.

Для отдельных участков поля точек на рис. 9.10 могут быть предложены некоторые зависимости, которые следует применять в пределах числа Фруда, обычных для групп судов одного и того же назначения или для разных групп в ограниченном диапазоне (в этих формулах указаны наибольшие в статистическом смысле отклонения) [19]:

$$\text{для } Fr = 0,3 \pm 0,6$$

$$\delta = \frac{0,425 \pm 0,025}{Fr^{1,4}}; \quad (9.61)$$

$$\text{для } Fr = 0,25 \pm 0,30$$

$$\delta = \frac{0,160 \pm 0,010}{Fr}; \quad (9.62)$$

$$\text{для } Fr = 0,14 \pm 0,26$$

$$\delta = 0,48 + (0,28 - Fr)^{0,5} \pm 0,11, \quad (9.63)$$

или

$$\delta = 1,09 - 1,68Fr \pm 0,12 \quad (9.64)$$

(тип формулы Александра).

Для танкеров и судов для перевозки массовых грузов

$$\delta = 1,05 - 1,4Fr \pm 0,06 \quad (9.65)$$

и

$$\delta = \frac{0,445 \pm 0,01}{Fr^{1,3}}. \quad (9.66)$$

Для сухогрузных судов (в том числе и лесовозов)

$$\delta = 0,99 - 1,2Fr \pm 0,35(Fr - 0,1) \quad (9.67)$$

и

$$\delta = \frac{0,43 \pm 0,01}{Fr^{1,5}}. \quad (9.68)$$

Для грузовых лайнеров, контейнерных и рефрижераторных судов

$$\delta = 0,91 - 1,1Fr \pm 0,06 \quad (9.69)$$

и

$$\delta = \frac{0,265 \pm 0,012}{Fr^{1,3}}. \quad (9.70)$$

Выбор окончательного значения δ при данном числе Fr для получения наилучших результатов возможен лишь в результате

оптимизации проекта в целом (см. гл. 11). При предварительной оценке характеристик формы можно принимать в среднем величину δ .

9.15. Положение центра впадины по длине судна. Положение шпангоута наибольшего сечения. Коэффициенты полноты оконечностей

Изменение положения ЦВ по длине судна меняет форму стрелой по шпангоутам. Например, перемещение ЦВ в нос увеличивает заострение кормы и уменьшает заострение носа, и наоборот.

Полные тизолодские суда, у которых впадина сопряжения играет основную роль, могут иметь полную носовую оконечность. Чрезмерное увеличение полноты кормовой оконечности этих судов может привести к увеличению сопротивления формы. Поэтому их средний ватерлиния (стреловая по шпангоутам) делается более полной в носу, чем в корме, что характеризуется тем, что ЦВ (т. е. ЦТ стреловой по шпангоутам или средней ватерлинии) располагается в нос от середины длины судна.

С увеличением скорости, как уже говорилось выше, должна быть увеличена длина судна и его относительная длина l . Одновременно уменьшаются δ и β в до некоторого предела φ . Все это способствует увеличению заостренности оконечностей стреловой по шпангоутам и, таким образом, уменьшению опасности возникновения значительного сопротивления формы в корме. Кроме того, увеличение общей заостренности носа способствует уменьшению волнового сопротивления. В результате для быстрых судов (большие Fr) рационально размещать ЦВ в корму от середины длины судна. Иногда и шпангоут наибольшего сечения отодвигается в корму от середины длины судна, что тоже способствует заострению носа.

У относительно тизолодских судов ($Fr \leq 0,25$) делается обычно цилиндрическая вставка. Таким образом, шпангоут наибольшего сечения, многократно повторяясь, занимает всю цилиндрическую вставку. Для судов с цилиндрической вставкой не имеет значения положение шпангоута наибольшего сечения. Остается решить вопрос о положении и протяженности цилиндрической вставки.

Положение ЦВ судна x_c отсчитывается обычно от середины его длины по грузовой (конструктивной) ватерлинии $L_{дг}$. Оно задается в функции Fr либо φ или δ , которые в свою очередь зависят от Fr . Так как δ играет особую роль при проектировании судна, широко распространена тенденция выражать x_c/L в функции δ .

По данным Вагенингского бассейна составлен рис. 9.11, где видна зависимость $x_c/L = f(\delta)$. Кривая 2 рассматривалась как оптимальная, а кривые 1 и 3 показывают пределы, между которыми может колебаться отношение x_c/L без заметного влияния на сопротивление судна 1631. При $\delta = 0,65$ ЦВ (по кривой 2) совпадает с серединой $L_{дг}$. При $\delta > 0,65$ значеная x_c/L , соответствующая

кривые 1, 2 и 3, могут быть определены по формуле

$$\frac{x_0}{L} = 0,022 \left[\sin \left(\frac{\pi}{2} \frac{\delta - 0,65}{0,15} \right) \pm 0,5 \right]. \quad (9.71)$$

При $\delta < 0,65$ можно использовать формулу

$$\frac{x_0}{L} = -0,011 \left[\sin \left(\frac{\pi}{2} \frac{0,65 - \delta}{0,15} \right) \pm 1,0 \right]. \quad (9.72)$$

Заменяя кривую 2 прямой, получаем

$$x_0/L = 0,12(\delta - 0,63) \pm 0,01. \quad (9.73)$$

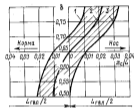


Рис. 9.11. Положение центра наибольшего сечения по длине судна.

Прямая, полученная по (9.73), дает значения x_0/L , несколько отличающиеся от значений, полученных по формулам (9.71) и (9.72). Однако эти отклонения не имеют существенного значения, поскольку сопротивление движению судна вблизи оптимального значения x_0/L является несущественным.

Кроме приведенных здесь формул, существуют и другие формулы, выражающие зависимость x_0/L от δ . По всем этим формулам получаются несколько расходящиеся результаты, при этом ЦВ перемещается в корму с увеличением скорости, что приводит к заострению стрелой по шпангоутам в нос.

Имеется целый ряд испытаний, в ходе которых определяются различные положения шпангоута наибольшего сечения на сопротивлении движению судна [54, 63].

Обычно при коэффициентах φ , соответствующих $Fr = 0,25 \div 0,27$, шпангоут наибольшего сечения принимается расположенным на середине длины КВЛ; для $Fr = 0,25 \div 0,30$ — на $10^{\frac{1}{3}} L_{\text{КВЛ}}$ шпангоуте, т. е. смещается на 2,5 % $L_{\text{КВЛ}}$ в корму; при $Fr > 0,3$ он может быть смещен на 11-й шпангоут, т. е. на 5 % от 10-го шпангоута в корму. Если по какому-либо соображению φ будет возможен прогиб средних значений (см. рис. 9.11), то шпангоут наибольшего сечения может быть передвинут ближе к средине

длины. По-видимому, заостренность носовой части в случае снижения φ и перемещения x_0 несколько и нос останется без изменения. Если учесть, что x_0/L может изменяться в зависимости от скорости судна пологими линиями (в нос) или отрицательным (в корму), то это приводит к разной заостренности носовой и кормовой оконечностей. В том случае, когда шпангоут наибольшего сечения тоже оптимизируется от середины длины, коэффициенты полноты носовой и кормовой частей должны вычисляться с учетом неодинаковости их длин (рис. 9.12). Отсюда

$$\delta_n = V_n / BTL_{n0} \quad (9.74)$$

$$\delta_k = V_k / BTL_{k0} \quad (9.75)$$

$$\varphi_n = V_n / BTL_{n0} \quad (9.76)$$

$$\varphi_k = V_k / BTL_{k0} \quad (9.77)$$

где индекс n означает нос, а индекс k — корму.

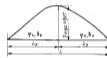


Рис. 9.12. Несимметричное сечение по шпангоутам.

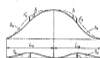


Рис. 9.13. Прерывающееся сечение по шпангоутам.

Коэффициент полноты шпангоута наибольшего сечения называется обычно коэффициентом полноты модель-шпангоута, хотя термин модель-шпангоут в настоящее время обычно относится к шпангоуту, лежащему посредине расчетной длины судна (длина между перпендикулярами, длина по ГВЛ, или по КВЛ), т. е. к тому шпангоуту, который при обычной разбивке теоретического чертежа на 20 шпангоутов оказывается десятым.

Следует учесть, что $V = V_n + V_k$, $L = L_n + L_k$. Отсюда и из формул (9.74) — (9.77)

$$\delta = (\delta_n L_n + \delta_k L_k) / L, \quad (9.78)$$

$$\varphi = (\varphi_n L_n + \varphi_k L_k) / L. \quad (9.79)$$

Положение ЦВ по длине судна — расстояние от среднего (десятого) шпангоута x_0 или от шпангоута наибольшего сечения $x_{\text{КВЛ}}$ — связано с величинами φ_n и φ_k (или δ_n и δ_k), L_n и L_k .

Для того чтобы установить эту связь, рассмотрим изменения стрелой по шпангоутам (рис. 9.13), имеющую коэффициент продольной оброты φ .

На носовую и кормовую ветви этой стрелы наращиваются площади S_n и S_k , ограниченные кривыми, обеспечивающими носовую стрелу плавные очертания.

Площади $S_n = \Delta q \beta B T L_{n\alpha}$ и $S_k = \Delta q \beta B T L_{k\alpha}$.

Рассмотрим случай перемещения Δx_{cm} ЦТ судна в нос (рис. 9.14). В этом случае S_n — положительная величина, а S_k — отрицательная.

Если площадь стрелой не меняется, то $S_n = -S_k$, или

$$\Delta q_n L_{n\alpha} = -\Delta q_k L_{k\alpha} \quad \text{или} \quad |\Delta q_n L_{n\alpha}| = |\Delta q_k L_{k\alpha}|. \quad (9.80)$$

Перемещение Δx_{cm} при неизменности площади стрелой после наращивания площадей найдено из выражения

$$q \beta L B T \Delta x_{cm} = \Delta q_n \beta B T L_{n\alpha} x_n + \Delta q_k \beta B T L_{k\alpha} x_k, \quad (9.81)$$

где $x_n = \rho_n L_{n\alpha}$ — отношение ЦТ площади наращиваемой носовой

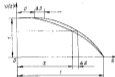


Рис. 9.14. Перемещение эквивалентного центра судна-прототипа по длине.

площади от плоскости шпангоута наибольшего сечения; $x_k = -\rho_k L_{k\alpha}$ — то же кормовой площади.

В результате преобразования имеем

$$\frac{\Delta x_{cm}}{L} = \frac{\Delta q_n L_{n\alpha}^2 \rho_n + \Delta q_k L_{k\alpha}^2 \rho_k}{q L^2}$$

Учитывая (9.80) и задавая $\rho_n = \rho_k$, получаем

$$\frac{\Delta x_{cm}}{L} = \frac{\Delta q_n}{q} \rho_n \frac{L_n + L_k}{L^2} = \frac{\Delta q_n}{q} \frac{L_n}{L} \rho_n. \quad (9.82)$$

Каждую из кривых, ограничивающих наращиваемые площади, удобно образовать двумя кривыми, симметричными на 3-й ординате при 10 ординатах наращиваемой площади, где находится их максимальная ордината f_n .

Кривые для носовой части (рис. 9.15) описываются выражениями:

левая ветвь (ближайшая к носовой длине)

$$f = f_n \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} \frac{x'}{0,7 L_n} \right);$$

правая ветвь (ближайшая к кормителю)

$$f = f_n \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} \frac{x'}{0,3 L_n} \right).$$

Симметрично носовой строится и кормовая ветвь.

Отношение ЦТ площадей S_n и S_k от плоскости шпангоута наибольшего сечения: $|\rho_n L_{n\alpha}|$ и $|\rho_k L_{k\alpha}|$, где $\rho_n = \rho_k = 0,653$.

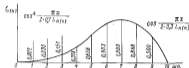


Рис. 9.15. Ординаты наращиваемой кривой при $\rho_n(x) = 0,653$; $\rho_k(x) = 0,653$.

Таким образом, из (9.82) получаем

$$\frac{\Delta x_{cm}}{L} = \frac{\Delta q_n}{q} \frac{L_n}{L} 0,653$$

или

$$\frac{|\Delta q_n|}{q} = \frac{\Delta x_{cm}}{L} \frac{1}{0,653 (L_n/L)}; \quad (9.83)$$

$$\frac{\Delta q_n}{q} = \frac{\Delta x_{cm}}{L} \frac{1}{0,653 (L_n/L)}. \quad (9.84)$$

Таким образом, зная желательное перемещение Δx_{cm} , можно получить $\Delta q_n/q$ и $\Delta q_k/q$. В случае преобразования стрелой при $L_n = L_k = 0,5 L$ $\Delta q_n = -\Delta q_k = |\Delta q|$.

В этом случае шпангоут наибольшего сечения становится средним (десятым)

$$|\Delta q| = 3,05 \frac{\Delta x_{cm}}{L} q.$$

В соответствии с известной релятивизацией Нормала для этого случая $|\Delta q| = 2,25 (\Delta x_{cm}/L)$, что соответствует $\varphi = 0,74$.

При $L_n = L_k$ имеем

$$\varphi_n = \varphi + 3,05 \frac{\Delta x_{cm}}{L} \varphi = \left(1 + 3,05 \frac{\Delta x_{cm}}{L} \right) \varphi; \quad (9.85)$$

$$\varphi_k = \varphi - 3,05 \frac{\Delta x_{cm}}{L} \varphi = \left(1 - 3,05 \frac{\Delta x_{cm}}{L} \right) \varphi. \quad (9.86)$$

Полуно отметим, что этот же метод установления зависимости ψ_n и ψ_n от φ , L_n и L_n приложим и к теоретическим чертежам с цилиндрической вставкой. В этом случае абсциссы отсчитываются от середины L и (9.81) остается действительным (см. рис. 9.16), но $x_n = L_{ЦВ} + 0,653 L_{n,2}$; $x_n = -(L_{ЦВ} + 0,653 L_{n,2})$.

К сказанному выше можно добавить, что способ, которым получали вышесказанные формулы, может быть использован для получения самой стрелы и построения по ней теоретического чертежа III.1.

При рассмотрении форм ГВЛ или КВЛ, соответствующих стрелам во шпангоут, следует обратить внимание на то, что ЦТ лло-



Рис. 9.16. Перестройка стрелы с цилиндрической вставкой наравлении площади.

шадя ВЛ, как правило, лежит в корму от середины длины судна и полнота кормовой части ГВЛ больше, чем носовой. Рекомендации по положению ЦТ площади ГВЛ отсутствуют. Однако были предложены формулы для полноты носовой и кормовой частей ГВЛ. Впервые это было сделано И. А. Яковлевым.

А. А. Богданов исследовал зависимость коэффициента полноты носовой части КВЛ от коэффициента продольной остроты объема той же носовой части [10]. Результаты этих исследований могут быть выражены формулой

$$\alpha_n = 0,75\psi_n + 0,23 \pm 0,03. \quad (9.87)$$

В этих исследованиях установили также зависимость между α_n и коэффициентом полноты ватерлиня α , из которой видно, что α_n меньше, чем α , следовательно, меньше чем α_n . Она может быть выражена формулой

$$\alpha_n = 1,7\alpha - 0,6 \pm 0,03. \quad (9.88)$$

Последняя формула действительна для $\alpha = 0,70 \div 0,87$. Для малых значений α величина $\alpha_n = 0,63 \pm 0,03$. Применению первой формулы следует отдать предпочтение, так как в ней связываются ме-

жду собой характеристики одной и той же части судовой поверхности.

Коэффициент полноты кормовой части ВЛ может быть получен из выражения

$$\alpha_n = \frac{\alpha L - \alpha_n L_n}{L_n}. \quad (9.89)$$

Это выражение при $L_n = L_n$ превращается в $\alpha_n = 2\alpha - \alpha_n$.

9.12. Заострение кормы

Средняя заостренность кормовой части средней ВЛ находится по формуле (9.54):

$$\operatorname{tg} \psi_n = \frac{\beta}{4L_n} \frac{\beta}{1 - \varphi_n}.$$

Значения этой заостренности для судов, не имеющих цилиндрической вставки (за исключением некоторых рыбопромысловых), обычно такие, что не вызывают значительного увеличения сопротивления формы. При образовании корпуса с цилиндрической вставкой (применяется при скорости, соответствующей $Fr < 0,25$) полагается опасность повышения сопротивления формы из-за недостаточного заострения кормы.

Бекер ввел критерий оценки условий возникновения увеличения сопротивления формы с учетом не только β , но и γ .

Если заменить в корме последний шпангоут цилиндрической вставкой равнобедренным квадратом, то сторона этого квадрата будет $\sqrt{\beta\beta\gamma}$. Если провести прямую, соединяющую середину нижней стороны этого квадрата с конической точкой КВЛ, то тангенс угла между осью ДЛ на плоскости КВЛ и указанной линией (рис. 9.17):

$$\operatorname{tg} \psi_n = \frac{\sqrt{\beta\beta\gamma}}{L_{n,2}} = \frac{\sqrt{\beta}}{L_{n,2}} \frac{\sqrt{\beta\gamma}}{L} = \frac{\beta^{1/2}}{L_{n,2}} \frac{\gamma^{1/2}}{L}. \quad (9.90)$$

где $L_{n,2}$ — длина кормового заострения; $L_{n,2}$ — относительная длина кормового заострения. Полуно отметим, что длина следа $A'G'$ рыбына, проведенной через точку G' , приблизительно равна $\sqrt{\beta\beta\gamma}$ (значно больше этой величины), и поэтому можно считать угол между AB и GB приблизительно равным ψ_n .

Переходя к относительной длине, из формул (9.90) и (4.3) можно получить

$$\operatorname{tg} \psi_n = \frac{1}{L_{n,2} \varphi^{1/2} \beta^{1/2}}. \quad (9.91)$$

В качестве критерия предельно допустимого значения кормового заострения Бекер принял величину, обратную $\operatorname{tg} \psi_n$:

$$A_n = 1/\operatorname{tg} \psi_n = \operatorname{ctg} \psi_n \geq 4,1.$$

Однако у некоторых рыбопромысловых судов k_B снижается до 3,3. Для большинства судов

$$\lg \psi_B = \frac{1}{L_{c,0} \beta^{1,3} \beta^2} < \frac{1}{4,1}$$

и

$$\lg \psi_B = \frac{\beta^{1,2}}{L_{c,0} \beta^{1,3} \beta^2} < \frac{1}{4,1}$$

Отсюда

$$k_B = L_{c,0} \psi^{1,2} \beta^2 \geq 4,1 \quad (9.92)$$

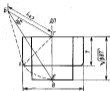


Рис. 9.17. К оценке заострения кормовой части судна.

и

$$k_B = \frac{L_{c,0} \beta^{1,2} \beta^2}{\beta^{1,0}} \geq 4,1 \quad (9.93)$$

Для быстроходных судов значение $k_B = L_{c,0} \psi^{1,2} \beta^2$ как безразмерное и отношение возникающего увеличенного сопротивления формы из-за отрыва потока в корме будет значительно превышать 4,1. Например, для судна, у которого $L_{c,0} = 0,45$ (канбальное сечение на 11-м теоретическом шпангоуте), $\psi = 0,62$ и $l = 8$, $k_B = 8$.

Из формул (9.92) и (9.93) можно найти минимальную относительную длину кормовой заострения:

$$L_{c,0} = k_B \psi^{1,2} \beta^2 \quad (9.94)$$

и

$$L_{c,0} = k_B \beta^{1,2} l \beta^2 \quad (9.95)$$

Для танкеров максимальная относительная длина по (9.90) $l = 5,75$ будет при $k_B = 4,1$ и $\psi = 0,85$. Отсюда для длинных танкеров $L_{c,0} = 4,1(0,85 \cdot 5,75) = 0,32$, и, таким образом, относительная длина кормовой части цилиндрической вставки $L_{c,0} = L_{c,0}/L = 0,5 - 0,32 = 0,18$.

Для коротких танкеров относительная длина по (9.90) $l = 4,95$ близка к нижнему пределу, а минимальное $\psi = 0,7$, отсюда

$$L_{c,0} = \frac{4,1}{0,7^{1,2} \cdot 4,95^2} = 0,45,$$

и тогда относительная длина кормовой части цилиндрической вставки $L_{c,0} = L_{c,0}/L = 0,5 - 0,45 = 0,05$.

Критерий Бизера, в общем характеризующий заострение кормы и определяющий предельную величину протяженности кормовой части цилиндрической вставки, не дает еще полной гарантии ликвидации сильного вихреобразования в корме. Для обеспечения такой гарантии следует обратить внимание на характер заострения кормовой заострения. Следует следить за тем, чтобы угол в области кормового заострения ватерлиний угла касательной к ним не составлял с ДП более 30° .

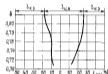


Рис. 9.18. Положение в протяженности заострения в цилиндрической вставке по Ленцблату.

В работе А. Линцблата [54] приведена диаграмма (рис. 9.18), данные которой незначительно отличаются от полученных здесь результатов.

Минимальные значения $k_B = 3,3$, о которых упоминалось выше, не зависят от наличия цилиндрической вставки и относятся к судам (траулеры и т. п.) с малым l и ψ . Например, при $L_{c,0} = 0,5$; $l = 4,2$ и $\psi = 0,6$ k_B достигает 3,3, что много ниже 4,1, но тем не менее такая величина иногда реализуется на шхерах и коротких траулерах, что связано с необходимостью обеспечения их остойчивости.

В настоящее время на значительном большинстве судов, плавающих при скорости, соответствующих числам Фруда $Fr \leq 0,4$, следует делать крейсерскую корму или усеченную крейсерскую корму (т. е. такую, у которой срезаема часть, спешивающаяся над водой). В этом случае рекомендуется принимать половину угла заострения ВЛ в районе гребного вентя одновинтовых судов не более 20° . Вогнутые ватерлинии применять не рекомендуется.

При значительных числах Фруда ($Fr = 0,5 - 0,6$) имеет смысл создавать полные батоксы. Это расширяет верхние ВЛ, у которых половина угла притыкания в корме доходит до 50° ; сама корма превращается в тризубцу и шпангоуты приобретают U-образную форму. Для более тихоходных судов кормовые шпангоуты имеют

форму, приближающуюся к V-образной. В ходе систематических испытаний в бассейнах можно получить и другие решения, касающиеся формы кормы. Для кормовых шпангоутов, у которых ЦТ площади погруженной части может быть перенесен вниз без вреда для устойчивости, иногда оказывается приемлемо создавать углубления в прикормовой части.

9.13. Форма носовой оконечности

Как видно из 9.11, значения α_n и φ_n гораздо ближе друг к другу, чем α_k и φ_k . Поэтому и форма стрелой по шпангоутам (средней ВЛ) и форма ВЛ в носовой части больше похожи друг на друга, чем в кормовой. В то же время угол заострения средней ватерлинии меньше, чем у КВЛ. В тех случаях, когда КВЛ имеет выпуклую или прямую форму у форштевня, стрелая по шпангоутам обычно имеет S-образную форму, хотя иногда и слабо выраженную. Это связано с формой носика ватерлиний, имеющих тоже более или менее резко выраженную S-образную форму. Наибольшую роль в волновом сопротивлении играют верхние подводные ватерлинии с завершающей их КВЛ. Их форма определяется в значительной мере стремлением ограничить волновое сопротивление.

В. И. Юркович, рассмотрев давление воды на носовую оконечность при волнообразовании, дает рекомендации по форме КВЛ в носу [63]. Он отмечает, что в области максимальных давлений, где носовая волновая вода имеет наибольшую высоту, желательно иметь минимальный угол между ДП и касательной к ватерлинии, чтобы составляющая давления, направленная вдоль ДП и образующая существенную часть волнового сопротивления, была возможно меньше. Это требование складывается и на заостренности стрелой по шпангоутам в носу, о чем говорилось выше. В. И. Юркович пришел к выводу, что зона максимальных давлений должна лежать впереди точки перегиба КВЛ. Тогда формула, полученная экспериментально, для отстояния этой точки от носа имеет вид

$$x/L = 1,525 Fr - 0,25, \quad (9.96)$$

Если руководствоваться этой формулой, то при $Fr < 0,16$ носовая часть КВЛ не должна иметь точки перегиба, т. е. должна быть выпуклой или прямой. Это объясняется малым значением волнового сопротивления при этих числах Фруда и стремлением получить большие значения b , что желательно для тихоходных судов.

При $Fr = 0,33 (x/L) = 0,25$, т. е. точка перегиба переносится на середину длины носовой оконечности, что вызывает большие конструктивные неудобства, связанные с малой ее полнотой. Поэтому практически на этом участке ГВЛ предвот вид прямой. Общая картина связи носового заострения КВЛ $\varphi_n/2$ с числом Фруда Fr дана на рис. 9.19. Приближенное выражение для этого угла, по исследованиям В. А. Соминой-Тяп-Шанской [63, 84], будет следующим:

$$\varphi_n/2 = 52 - 139 Fr. \quad (9.97)$$

В [85] определен и угол заострения в носу средней ВЛ:

$$\varphi_{n,2} = 47 - 134 Fr. \quad (9.98)$$

Отношение между углами заострения довольно стабильно: $\varphi_n/\varphi_{n,2} = 1,13 \pm 0,06$.

Необходимо помнить, что минимальное значение $\varphi_n/2$ не должно быть менее 8° . Это значение определяется технологическими условиями и требованиями к прочности (прочностью прилегающей к форштевню части носа при косом направлении волнения).

Для судов, имеющих $Fr < 0,25$, можно рассмотреть вопрос о применении цилиндрической вставки. Вместо ее, следует учитывать возможность появления в корме цилиндрической вставки дополнительной волновой системы, увеличивающей сопротивление движению судна.



Рис. 9.19. Заострение носовых ватерлиний.



Рис. 9.20. Относительные длины носовой части цилиндрической вставки и носового заострения.

На рис. 9.20 показаны зависимости относительной длины цилиндрической вставки в носовой оконечности и носового заострения от Fr , построенные по данным Ватенингского бассейна (кривая 1) и бассейна Тейлора (США) (кривая 2). По данным 60-й серии бассейна Тейлора, относительная длина носового заострения может быть оценена как

$$L_{нз} = L_{нз}/L = 2,1 Fr - 0,025. \quad (9.99)$$

Ватенингский бассейн рекомендует выбирать большую протяженность цилиндрической вставки и меньшую длину носового заострения, что может быть выражено при $Fr = 0,15 - 0,22$,

$$L_{нз} = 2,1 Fr - 0,052, \quad (9.100)$$

а при $Fr = 0,22 - 0,25$:

$$L_{нз} = 4,2 Fr - 0,525. \quad (9.101)$$

Л. М. Ногод, учитывая интерференцию волновых систем, считает, что при $Fr < 0,195$ имеет смысл ориентироваться на значения, полученные по зависимости (9.99), а при $Fr > 0,195$ — по зависимости (9.100) и (9.101).

Современные супертанкеры ($Fr = 0,12$), по данным М. Н. Борбалява, имеют $I_{x,0}$, приближающиеся к значениям, полученным по формуле (9.99).

Из сравнения значений (см. рис. 9.20) для цилиндрической вставки с данными, приведенными в 9.12, следует, что предельная полость для цилиндрической вставки может несколько превышать 40 % L . Протяженность и положение цилиндрической вставки по А. Линдбладу [54] показаны на рис. 9.18.

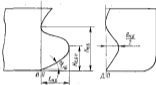


Рис. 9.21. Основные характеристики носового булба.

Во второй половине XIX в. на крупных боевых кораблях стали применять таранные обводы носа. Вследствие влияния таранных обводов на ходкость стали применять утолщения обводов судна в районе носового перпендикуляра, т. е. носовые булбовые обводы — носовой булб. Известный американский кораблестроитель Д. Тейлор высказывался о положительном влиянии булбовых обводов на ходкость.

Считалось, что такое положительное влияние проявляется при $Fr = 0,25 \div 0,35$. Л. М. Ногод рассматривал вопрос о наилучшем соотношении $I_{x,0}$ между наибольшим по площади шпангоутным сечением булба $S_{x,0}$ и площадью шпангоута наибольшего сечения S_{max} . Табличные результаты, полученные им для указанных выше чисел Фруда, могут быть выражены формулой

$$I_{x,0} = S_{x,0}/S_{max} = 0,4 (Fr = 0,1). \quad (9.102)$$

В настоящее время установлено, что положительный эффект от применения носового булба проявляется и при сравнительно низких числах Fr , особенно на судах с большими δ и малым L/B .

В. А. Селезнев-Тин-Шанская исследовала вопрос о целесообразности применения носового булба при $Fr = 0,17 \div 0,32$ и дала ряд рекомендаций [83, 84].

Объемным водонизмерением булба $V_{x,0}$ считается его объем в нос от носового перпендикуляра, т. е. от нулевого зантогута судна. Характеристиками носового булба являются (рис. 9.21): $L_{x,0}$ — расстояние от носового перпендикуляра судна до передней точки булба; этой величине соответствует относительная величина $l_{x,0} = L_{x,0}/L$; $B_{x,0}$ — наибольшая ширина булба; этой величине соответствует относительная величина $b_{x,0} = B_{x,0}/B$; $H_{x,0}$ — наибольшая высота шпангоута наибольшей площади булба; обычно $H_{x,0} = T$; $H_{x,0,0}$ — высота передней точки булба от основной плоскости; этой величине соответствует относительная величина $h_{x,0} = H_{x,0,0}/T$; $\varphi_{x,0}$ — угол подъема нижней кромки булба над основной плоскостью судна, измеренный в районе носового перпендикуляра.

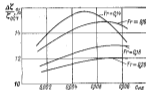


Рис. 9.22. Зависимость коэффициента смоченного сопротивления.

Статистическое обобщение экспериментальных исследований показало, что указанные безразмерные характеристики булба при $Fr = 0,17 \div 0,32$ имеют следующие значения: $0,17 < Fr < 0,21$ $I_{x,0} = 0,061 - 0,115 Fr \pm 0,006$; $0,24 < Fr < 0,365$ $I_{x,0} = 0,102 - 0,3 Fr \pm \pm 0,006$; $0,275 < Fr < 0,32$ $l_{x,0} = 0,051 - 0,116 Fr \pm 0,006$; $b_{x,0} = 0,145 \pm 0,025$; $\varphi_{x,0} = 34 - 105 Fr$ (град);

$$\text{при } Fr < 0,20 \quad I_{x,0} = 0,06 + 0,25 \sqrt{1,088 Fr - 0,007};$$

$$\text{при } Fr > 0,24 \quad I_{x,0} = 0,017 + (1,85 Fr - 0,311)^{0,5}.$$

Коэффициенты кинематического сопротивления, относящиеся к объему их вперед от носового перпендикуляра $V_{x,0}$ и указанным выше его размерам $L_{x,0}$, $B_{x,0}$, $H_{x,0}$, будут следующими: $\beta_{x,0} = 0,65 \pm \pm 0,04$; $\varphi_{x,0} = 0,76 \pm 0,04$; $\delta_{x,0} = \varphi_{x,0} \beta_{x,0} = 0,49 \pm 0,05$.

Отношение объемного водоизмещения носового бульба к водоизмещению судна

$$\kappa_{n,0} = \frac{V_{n,0}}{V} = \frac{B_{n,0}}{\beta} \frac{\varphi_{n,0}}{\varphi} \frac{H_{n,0}}{T} \frac{B_0}{B} \frac{L_{n,0}}{L} \approx 0,02.$$

Учитывая сравнительно большую близость значения $\varphi_{n,0}$ и φ , имеет смысл исследовать влияние на ходкость величин

$$c_{n,0} = \frac{S_{n,0}}{B^2} \frac{L_{n,0}}{L}.$$

Изменение коэффициента остаточного сопротивления $\Delta \zeta = f(c_{n,0})$ показано на рис. 9.22. На этом рисунке видна область, где носовой бульб действует на ходкость положительно.

10

ПОСТРОЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ЧЕРТЕЖА

10.1. Постановка задачи

Выше были указаны пути определения основных характеристик размеров и формы судна.

Теоретический чертеж, изображающий поверхность судна и дающий самую общую характеристику его формы, строится на основании определенных в процессе проектирования главных размеров и целого ряда характеристик формы. Особое значение при этом имеют коэффициенты полноты κ , прежде всего, коэффициенты полноты водоизмещения, или коэффициенты общей полноты δ , коэффициенты полноты грузовой (конструктивной) ватерлинии α и коэффициенты полноты шпангоута наибольшей площади β , который принято называть коэффициентом полноты киля. К этим трем коэффициентам добавляются зависящие от них коэффициент продольной остроты $\varphi = \delta/\beta$ и коэффициент вертикальной полноты $\chi = \delta/\alpha$, а также многие другие, хорошо характеризующие форму судна и рассматриваемые в гл. 9.

Кораблестроители в течение многих веков уделяли особое внимание созданию теоретического чертежа. История этого вопроса весьма обширна. Ниже (10.2) кратко перечислены многие способы построения теоретического чертежа, которые использовались или только предлагались, начиная с середины XVIII в. Часть из них, почти не имеющих сегодня признания, может тем не менее быть использована в дальнейшем.

10.2. История вопроса

В течение многих лет теоретический чертеж рисовали от руки так, чтобы получались нужные главные размеры. Коэффициенты полноты определяли в свое время по полученным «методом рисования» и оцененным по широкости и красоте линиям теоретического чертежа. «Метод рисования» существует и сегодня, правда, к вопросу получения коэффициентов полноты, особенно δ , сейчас, естественно, относятся более строго, чем во времена парусного деревянного флота.

В середине XVIII в. стали применять геометрические приемы построения теоретического чертежа. Дюамель де Момо предло-

жил применять так называемую прогрессивку при построении теоретического чертежа. Его предложение нашло поддержку адмирала Мауро и использовалось в британском флоте.

К XVIII в. относятся и первые попытки выразить обводы акадических. Известный шведский кораблестроитель Ф.Г. Чапман предложил в 1769 г. строить ватерлинии по такой параболе:

$$y = y_{max} \left[1 - \left(\frac{x}{L_{(x)}} \right)^n \right], \quad (10.1)$$

где y_{max} — наибольшая ордината ватерлинии, от которой зависит ординаты (полуширота) ватерлинии; x — абсцисса шпангоута, номерная от шпангоута наибольшего сечения; $L_{(x)}$ — длина ко-

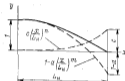


Рис. 10.1. Комбинированная параболическая кривая Тейлора.

сового (кормового) звостреика; α — коэффициент полноты дна — обвода ВЛ.

Главным достоинством выражения (10.1) является простота связи y с x и особенно с α . Однако серьезным недостатком параболы, построенной по (10.1), являлся отсутствие точки перегиба, что ограничивало ее применение. Следует отметить, что рассматривая α как коэффициент кривой вообще, можно получать и другие кривые по формулам, аналогичным (10.1).

Несмотря на недостатки (10.1), Чапман применял ее для построения ватерлиний теолоидных полных корпусов шведских кораблей конца XVIII — начала XIX вв.

В России по инициативе командующего Черноморским флотом адмирала А. Г. Грейга эту формулу использовали в первой половине XIX в. при постройке ватерлиний черноморских кораблей.

В настоящее время ее можно применять для создания верхних ватерлиний полных судов, а также ватерлиний лебедков, для последних качества которых точки перегиба могут иметь вредные последствия. Парабола Чапмана может оказаться полезной при некоторых исследованиях характеристик формы судна (см. 6.5) и послужит основой построения аналитических выражений, выражающих судовую поверхность целиком (см. 10.5).

Впоследствии делались попытки ввести в эту формулу дополнение для придания ей более универсальной формы. Д. Тейлор в 1903 г. дополнил параболу Чапмана еще одной параболой, что дало

возможность получать ватерлинии с точкой перегиба $x_{(y)}$ (рис. 10.1):

$$y = y_{max} \left[1 - \alpha \left(\frac{x}{L_{(x)}} \right)^n + (\alpha - 1) \left(\frac{x}{L_{(x)}} \right)^m \right]. \quad (10.2)$$

Величины α , m и n в этой формуле могут быть получены из трех дополнительных условий — заданной площади, заданного зюстрейка в оконечности, заданного положения точки перегиба:

$$S_{(x)} = \alpha L_{(x)} y_{max} = \int_0^x y dx;$$

$$\lg \Psi_{(x)} = \left| \frac{dy}{dx} \right|_{x=L_{(x)}};$$

$$\left| \frac{d^2y}{dx^2} \right|_{x=x_{(y)}} = 0.$$

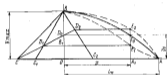


Рис. 10.2. Построение прогрессивных обводов.

В конце 20-х годов XX в. Г. П. Вайнблюм предложил еще один способ построения ватерлиний двух парабол, заданной обводами произведением двух парабол.

Вместо чапмановской параболы позднее стали применять прогрессивку, представляющую собой одну из вариантов кривых, которые могут быть получены при помощи так называемого прогрессивного интеграла, изображенного в форме, приданной ему И. А. Яковлевым.

На рис. 10.2 исходной преобразованной кривой является кривая AE_0B , описываемая выражением $y_0 = f_0(x)$. Построением, показанным на рис. 10.2, можно получить кривые, более полную AE_2B и менее полную AE_1B , чем исходная AE_0B . Практическое значение имеет построение менее полной кривых с помощью луча BC_1 . Величина OC_1 (так же как величина OC) считается положительной; величина OC_2 — отрицательной. Построение кривой AE_1B , как можно видеть из рис. 10.2, приводит к выражению

$$y = y_{max} \left(\frac{y(x)(1-c)}{y_{max} - c \cdot f_0(x)} \right). \quad (10.3)$$

Корабельный инженер А. А. Попов (отец) положил в основу преобразования чепышовскую параболу (10.1) и получил уравнение прогрессивки

$$y = y_{\max} \frac{1 - (x/L_{\text{кор}})^n}{1 + \frac{1}{1-c} \left(\frac{x}{L_{\text{кор}}} \right)^n} \quad (10.4)$$

Сын А. А. Попов детально проанализировал эту кривую при $n = 2$, С. П. Дюжин — при $n = 3$, И. Г. Бубнов — при $n = 1,5 \div 5$ с шагом $\Delta n = 0,5$. Все эти авторы составили подробные таблицы, позволяющие строить теоретические чертежи по указанным формулам.

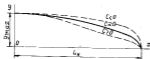


Рис. 10.3. Кривые Арзевцова.

Следует обратить внимание на то, что преобразование параболы джет прогрессивки как с точкой перегиба, так и без нее.

Прогрессивкем треугольником пользовался и строитель первых броненосцев возродившийся в последней четверти XIX в. Черноморского флота корабельный инженер К. Н. Арзевцов. Он в качестве кривой AEB ($y_0 = f_n(x)$) принял четверть эллипса [11]:

$$y_0 = y_{\max} \sqrt{1 - (x/L_{\text{кор}})^2}$$

и получил

$$y = y_{\max} \frac{1 - c + \sqrt{1 - (x/L_{\text{кор}})^2}}{1 - c + \sqrt{1 - (x/L_{\text{кор}})^2}} \quad (10.5)$$

При $c > 0$ обводы по (10.5) приобретают в носу бульбовую форму (рис. 10.3).

Попытку выразить судовые обводы разнородными многочленами сделали Д. Тейлор (многочлен 5-й степени) и Л. М. Ногин (выгоден 4-й степень). Коэффициенты этих многочленов должны были определяться из тех же условий, что и те, из которых определялись коэффициенты в выражении (10.3). Следует помнить, что неудачно введенные абсолютные условия могли приводить к тому, что получаемые по многочленам Д. Тейлора и Л. М. Ногина линии оказывались непригодными для использования в теоретическом чертеже.

Впоследствии был сделан еще ряд попыток применения математических выражений к построению судовых обводов В. И. Афанасьевым, В. И. Алмазовым, И. А. Яковлевым, А. Б. Карповым, Б. А. Тронским и многими другими [11]. И. А. Яковлев предложил аналитический способ построения комплекта обводов (нос—горизонт).

В настоящее время наибольшее значение имеют две группы способов построения теоретического чертежа. Они в них основаны на сочетании построения ориентировочной геометрической формы теоретического чертежа с последующей доработкой методом рисования, т. е. от руки (см. 10.3, 10.4). Другие основываются на использовании одного или двух прототипов (см. 10.5 и др.), например, перестроения прототипа путем аффинного преобразования (см. 10.6), перестроения чертежа преобразованием его строеной по шпангоутам (см. 10.3), выражением площади (см. 9.11).

Использованию двух прототипов положило начало корабельный инженер Р. А. Матросов, по иже которого К. В. Кузьмин строил теоретические чертежи, ordinаты которых составлялись из ordinаты одного чертежа и $\left[1 - \frac{1}{n}\right]$ ordinаты другого. Таким образом получались чертежи с ordinатами

$$y = \frac{1}{n} y_1 + \left(1 - \frac{1}{n}\right) y_2$$

Этот метод можно назвать «гибридным» обводов. Разлитием его является интерполяционный метод (см. 10.7).

Указанные методы являются по существу методами построения комплекта судовых обводов, которые предлагались И. Г. Бубновым, Б. А. Тронским, А. Б. Карповым и другими авторами. К ним принадлежит и джетовый метод академика АН УССР Г. Е. Павленко (см. 10.10) [11].

Д. Тейлором был предложен новый способ получения обводов теоретического чертежа судна нужной полноты и приблизительно подходящих размеров путем его выбора из серии готовых чертежей. Затем в результате несложных расчетов в бассейне можно получить данные, позволяющие определять мощность ЭУ для достижения заданной скорости. Именно в тейлоровском бассейне была создана так называемая 60-я серия чертежей, которая широко используется при проектировании сравнительно мелких судов.

В настоящее время разрабатываются методы получения теоретического чертежа при помощи ЭВМ [11]. В основу построения обводов судна таким способом может быть, в частности, положен интерполяционный способ построения теоретического чертежа (см. 10.7).

10.3. Приближенные способы проектирования строеной по шпангоутам и конструктивной ватерлинии

И. А. Яковлев, указав на особое значение строеной по ватерлинии и конструктивной (грузовой) ВЛ, предложил приближенный способ их построения, являющийся частью общего предельного

им способа построения теоретического чертежа. При этом кривые для носа и кормы обычно строятся отдельно.

Здесь изложены основы построения И. А. Яковлева в несколько измененном виде. Вместо створной по шпангоутам имеет смысл строить кривую средних ординат шпангоутов (среднюю ВЛ), которая может быть построена двумя способами.



Рис. 10.4. Средняя ватерлиния в форме трапеции.

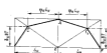


Рис. 10.5. Средняя ватерлиния в форме Морозова.

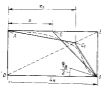


Рис. 10.6. Построение носовой части створной или средней ватерлинии.

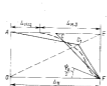


Рис. 10.7. Построение створной при наличии цилиндрической вставки.

Первый способ состоит в замене средней ВЛ трапецией AC_1FO (рис. 10.4), в которой AO — это площадь шпангоута наибольшего сечения βBT .

Тогда закон

$$V_n = \beta_n BT L_n = \beta VT L_n - \frac{\beta}{2} BT (L_n - x),$$

то $x = (2\beta_n - 1) L_n$.

Учитывая (6.15), получаем такую же фигуру, в которой $AO = (\beta/2) B$.

Во **втором способе** кривая заменяется четырехугольником Морозова (рис. 10.5). При этом $x_1 = \varphi_n L_n$, и основание C_1 от OF равно $\delta_n B$.

Может быть применена и комбинация обоих способов (рис. 10.6). Кривая в точке F должна иметь касательную к OF под углом $\varphi_n/2$

(см. 9.10). Так же выполняется построение при наличии цилиндрической вставки. В этом случае на AO откладываются $L_{n,2}$ и $L_{n,1}$ (рис. 10.7).

Кормовая часть обвеса кривых строится аналогично, но в ней фигурируют величины, у которых вместо β_n стоит индекс кормы β_k .

Все нужные величины $L_{n,1}$, $\varphi_n/2$, $L_{n,2}$, δ_n , β_n , $L_{n,1}$ и $L_{n,2}$ берутся из гл. 9. Подобным же образом строится КВЛ при $AO = B/2$ (рис. 10.4—10.7). Необходимые величины берутся из гл. 9.

Во избежание получения искаженных обводов носа и кормы следует при построении вышеназванных кривых учитывать формулы, имеющиеся в 9.12 и 9.13, и заносить соответствующие углы заострений на осиные КВЛ и в средней ВЛ (или створной) (13).

10.4. Построение теоретического чертежа по И. А. Яковлеву и развитие его способа

Имея створную по шпангоутам или среднюю и грузовую (конструктивную) ватерлинии, можно определить приближенную форму всех шпангоутов, каждый из которых задается двумя прямыми.

Для этой цели на каждом шпангоутном сечении заносится: 1) осадка T ; 2) ордината грузовой (конструктивной) ватерлинии $W_{гk}$; 3) ордината средней ватерлинии $W_{сk}$.

В результате получается четырехугольник ACP_1E (рис. 10.8) с заданной площадью, согласно створной по шпангоутам, и шириной по КВЛ. Провода кривую EC , так чтобы площадь, ограниченная ею, DE и КВЛ, равнялась площади S_1 , получим шпангоут нужной формы. Кривая EC должна проходить как можно ближе к ломаной EP_1C и совпадать с ней в двух крайних и в двух промежуточных точках. Построение шпангоутов и надводной части в укл. виде ВЛ в оконечностях производится из общих проектных соображений.

Указанный способ может быть несколько видоизменен, если требуется получить какие-либо специальные обводы, например остроскопленные или, наоборот, со значительными участком плоского дна. Для этой цели четырехугольник ACP_1E может быть перестроен (рис. 10.9) следующим образом. Проводя линию E_1C_1 , параллельную EC , и строя любой треугольник с основанием EC и вершиной P_2 , лежащей на линии E_1C_1 , получаем ряд четырехугольников типа ACP_2E , площадь которых равна площади четырехугольника ACP_1E и, следовательно, S_1 . Выбрав горизонтальное смещение точки P_2 через $\Delta r = \delta_n (W_{дкд} - W_n)$ и приняв коэффициент δ_n по так называемому балласту-шпангоуту, можем построить все шпангоуты, ориентируясь на четырехугольник ACP_2E . Балласт-шпангоуты (см. 10.5) являются 3-8 и 17-4 шпангоуты при 20 шпангоутах теоретического чертежа. На сечениях по этим шпангоутам подбирается нужное положение точки P_2 . Во всех остальных сечениях δ_n принимается по балласт-шпангоутам. Ко-

эффицент k_n может колебаться от нуля до значения, несколько большего единицы. В последнем случае ватерлинии, ближайшие к грузовой, будут иметь ординаты, большие, чем ГВЛ.

Может быть применен и другой, основанный на той же идее, способ построения теоретического чертежа. За основные кривые могут быть приняты не шпангоуты, а ватерлинии. Вместо стрелой по шпангоутам (средней ВЛ) может быть использована стрелая по ватерлиниям (шпангоут средней площади). В этом случае исходными линиями будут полуобвод шпангоута наибольшей площади сечения и стрелая по ватерлиниям или, точнее, две отдельные стрелые (для носа и для кормы). Стрелую по ватерлиниям

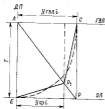


Рис. 10.8. Построение шпангоута по И. А. Яковлеву.

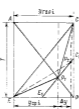


Рис. 10.9. Параметры шпангоутного сечения.

удобнее заменить полуобводом шпангоута средней площади. Ватерлинии могут строиться так, как это делалось для КВЛ в предыдущем варианте построения теоретического чертежа.

Этот способ пригоден, если необходимо получить стрелую по ватерлиниям определенной формы, например для значительного изменения поперечного момента инерции ватерлинии при изменении осадки. Работа в этом случае начинается с построения шпангоута наибольшего сечения. Для удобства построения необходимо масштаб по длине сократить так, чтобы величинам L_n и L_k изображались отрезками, близкими по размеру к $B/2$.

Не следует забывать, что чертежи, построенные этими способами, нуждаются в тщательном согласовании, так как крайние обводы чертятся все же за глаза, хотя и по хорошим ориентирам.

10.5. Баланс-шпангоуты. Шпангоут наибольшего сечения

В 10.4 уже упоминались баланс-шпангоуты, так же и в ряде других мест книги — шпангоут наибольшего сечения. Эти три поперечных сечения довольно полно характеризуют теоретической корпус судна, что позволяет строить его же описанным выше способом по многим сечениям, а по трем шпангоутным сечениям. В данном случае можно довольно быстро получить приемлемый теоретический чертеж, хотя прорисовка линий чертежа должна выполняться более опытным исполнителем.

Значение баланс-шпангоутов очевидно из простейшей на формулу квадратур, предложенных П. Л. Чебышевым и введенных в практику судостроительных расчетов А. Н. Крыловым.

Простейшая схема расположения характерных тебушских сечений следующая:

$x_{cp} = 0,5 L$ — шпангоутное сечение на середине длины судна;
 $x_n = 0,297 (L/2)$ — шпангоутное сечение в носовой части (x_n измеряется от носового перпендикуляра);

$x_k = 0,297 (L/2)$ — шпангоутное сечение в кормовой части (x_k измеряется от кормового перпендикуляра).

Площадь, ограниченная кривой и осью x по Чебышеву—Крылову:

$$S = \frac{L}{3} (y_n + y_{cp} + y_k).$$

В этой формуле y_n , y_{cp} и y_k при построении ВЛ — ординаты, соответствующие абсциссам x_n , x_{cp} и x_k ; при использовании стрелой — площади шпангоутов, соответствующих тем же абсциссам. В последнем случае $S = V$.

Вычисления по этой формуле дают предельную погрешность до 5%.

Округлая коэффициенты абсцисс, можно принять, что носовое тебушское сечение расположено на 3-м шпангоуте при 20 шпангоутах, а кормовое на 17-м шпангоуте. Площадь среднего шпангоута (мидель по современным терминологическим стандартам) и шпангоута наибольшего сечения весьма близки. Поэтому, используя эти сечения, можно получать чертеж с нужным водоизмещением, погрешность значения которого легко устранить в процессе согласования линий чертежа.

В результате строим 3-й и 17-й шпангоуты, например, способом, указанным в 10.4; шпангоут наибольшего сечения — либо тем же способом, либо (в случае полных обводов) — способом, описанным ниже, а затем чертим ватерлинии, по которым приближаем остальные шпангоуты. При этом построении выгодно совмещать масштабы по оси x по сравнению с масштабом по оси y .

Шпангоут наибольшего сечения может быть построен по И. А. Яковлеву (см. 10.4).

Для шпангоута наибольшего сечения очень полных судов с плоским днищем, прямыми бортами и круглой скулой (рис. 10.10) радиус r крайних этой скулы просто связывается с B .

Площадь между скулой и описанным прямоугольником равна

$$r^2 - \frac{\pi}{4} r^2 = r^2 \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) = 0,215r^2.$$

Таким образом,

$$\beta = \frac{BT - 2 \cdot 0,215r^2}{BT} = 1 - 0,43 \frac{r^2}{BT}$$

и

$$r = \sqrt{\frac{1-\beta}{0,43} BT} = 1,525 \sqrt{(1-\beta) BT}. \quad (10.6)$$



Рис. 10.10. Схема построения шпангоута-шпангоута.

Для других форм шпангоута наибольшего сечения вывод формул, связывающих β с характеристиками шпангоута, осложняется. Была получена такая система уравнений для шпангоута с горизонтальным килем, наклонным днищем и наклонным бортом. Автор этой системы А. А. Богданов предлагал решать ее на ЭВМ.

Полуно следует заметить, что даже при не очень высоких значениях β , очень широкие суда должны иметь плоское днище, хотя бы в средней по длине части, так как по условиям прочности требуется ставить их в док на две килевые дорожки, и в этом случае уклон днища будет осложнять работы.

10.6. Аффинное перестроение чертежа прототипа

В практике проектирования широко применяется получение теоретического чертежа проекта из перестроения чертежа прототипа. Наиболее простым способом перестроения теоретического чертежа является аффинное его преобразование. Такое преобразование возможно только в том случае, когда изменяются L , B и T , а δ и другие коэффициенты полноты остаются неизменными. При этом водонепроницаемость, положение ЦВ, метacentрические радиусы и другие элементы чертежа легко вычисляются по простым формулам, ос-

нованным на частичном подобии получаемой формы судна его исходной форме.

Рассматривая частный случай такого преобразования, когда меняется только B , получим ординаты нового чертежа умноженными исходных ординат на коэффициент $\delta_2 = B_2/B_1$, где индекс «2» относится к исходному, а «1» к проектируемому чертежу. Таким образом, $y_2 = \delta_2 y_1$. Построение такого чертежа чрезвычайно просто: плановые линии чертежа прототипа остаются плоскими и на чертеже проектируемого судна.

В том случае, когда изменяется только осадка, построение нового чертежа заключается лишь в изменении расстояния ΔT между ватерлиниями, которое определяется из выражения

$$L_2 = T_2/T_1 = \Delta T_2/\Delta T_1. \quad (10.7)$$

Из аналогичного выражения определяется расстояние между теоретическими шпангоутами ΔL при изменении длины судна:

$$L_2 = L_2/L_1 = \Delta L_2/\Delta L_1. \quad (10.8)$$

В общем случае изменяются L , B и T , при этом в чертеже ординаты y изменяются пропорционально B_2/B_1 , расстояния между ВЛ — пропорционально T_2/T_1 и расстояния между теоретическими шпангоутами — пропорционально L_2/L_1 . Для этого общего случая будем иметь:

коэффициенты полноты δ , α , β , φ , χ неизменными;
объемное водонепроницаемость

$$V_2 = \frac{L_2 B_2 T_2}{L_1 B_1 T_1} V_1;$$

площадь ВЛ (абсциссы строевой по ВЛ)

$$S_{1L} = \frac{L_2 B_2}{L_1 B_1} S_{1L};$$

площадь шпангоутов (ординаты строевой по шпангоутам)

$$S_{2L} = \frac{B_2 T_2}{B_1 T_1} S_{2L};$$

отстояние ЦВ от килевой линии

$$z_{c1} = \frac{T_2}{T_1} z_{c1};$$

отстояние ЦВ от середины L (обычно десятого шпангоута)

$$x_{c1} = \frac{L_2}{L_1} x_{c1};$$

момент инерции площади ГВЛ (или КВЛ) относительно продольной оси

$$I_{2L} = \frac{L_2 B_2^3}{L_1 B_1^3} I_{2L};$$

момент инерции площади ГВЛ относительно главной поперечной оси

$$I_{y_1} = \frac{L^3 \delta_1}{12 \delta_2} I_{y_1'}$$

поперечный метacentрический радиус

$$\rho_1 = \frac{B^2 \Gamma_0}{4 \Gamma_1} \rho_1'$$

продольный метacentрический радиус

$$R_1 = \frac{L^2 \Gamma_0}{12 \Gamma_1} R_1'$$

и т. д.

При чрезвычайно простом аффинном преобразовании его недостатком является обязательная неизменность всех коэффициентов теоретического чертежа, что позволяет использовать его только в том случае, когда при переходе от прототипа к проекту скорость судна v и число Фруда Fr изменяются неизменно.

Если по формулам (9.10) для коэффициента общей волности δ при изменении скорости v и числа Фруда Fr значение δ проекта будет значительно отличаться от значения δ прототипа, то можно будет принять $\delta_2 = \delta_1$. В этом случае можно будет оставить и все прочие коэффициенты неизменными и перестроить чертеж аффинным способом. Изменяя $b_T = B/T$ и $b_r = H/T$, можно добиться нужной остойчивости, живучести и т. д.

10.7. Интерполяционный способ построения теоретического чертежа

Интерполяционный способ может применяться тогда, когда имеются два чертежа-прототипа: один с коэффициентом δ_1 , большим δ проекта; другой с коэффициентом δ_2 , меньшим δ проекта. После приведения обоих чертежей к размерности проекта путем аффинного преобразования (см. 10.6) можно получить два теоретических чертежа с одинаковыми главными размерениями, но с разными δ . На рис. 10.11 показано одно из шпангоутных сечений этих чертежей.

Объем, заключенный между поверхностью судна с δ_1 и поверхностью судна с δ_2 ,

$$V_1 - V_2 = (\delta_1 - \delta_2) LBT = \int_{x=0}^{x=L} \int_{z=0}^{z=T} y_1 dz dx - \int_{x=0}^{x=L} \int_{z=0}^{z=T} y_2 dz dx = \int_{x=0}^{x=L} \int_{z=0}^{z=T} (y_1 - y_2) dz dx \approx \sum_{j=1}^{j=L} \sum_{k=1}^{k=T} (y_1 - y_2) \Delta L \Delta T. \quad (10.9)$$

Отсюда

$$(\delta_2 - \delta_1) \approx \frac{\sum \sum (y_1 - y_2)}{B} \frac{\Delta L}{L} \frac{\Delta T}{T}. \quad (10.10)$$

Здесь и далее пределы двойного суммирования те же, что и в следующем выражении (10.9).

Таким образом, сумма разностей всех ординат двух теоретических чертежей при фиксированных главных размерениях и одинаковых расстояниях ΔL и ΔT между шпангоутами и интерполиция пропорциональна разности $(\delta_2 - \delta_1)$. Так же и

$$(\delta_2 - \delta) \approx \frac{\sum \sum (y_2 - y)}{B} \frac{\Delta L}{L} \frac{\Delta T}{T}. \quad (10.11)$$



Рис. 10.11. Построение шпангоута интерполяционным способом.

Из (10.10) и (10.11) имеем

$$\frac{\delta_2 - \delta}{\delta_2 - \delta_1} \approx \frac{\sum \sum (y_2 - y)}{\sum \sum (y_1 - y_2)}. \quad (10.12)$$

Выражение (10.12) может быть использовано для построения теоретического чертежа с коэффициентом δ при наличии чертежей с коэффициентами δ_1 и δ_2 .

Для получения практических результатов надо установить закон изменения разностей $(y_2 - y)$ в зависимости от положения ординат. Простейшим законом в этом случае будет пропорциональность разности $(y_2 - y)$ разности $(y_1 - y_2)$ для ординат, лежащих на одноименных шпангоутах при одноименных ВЛ, т. е.

$$\frac{y_2 - y}{y_1 - y_2} = k_p. \quad (10.13)$$

Подставляя (10.13) в (10.12), получим

$$\frac{\delta_2 - \delta}{\delta_2 - \delta_1} = \frac{\sum \sum (y_1 - y)}{\sum \sum (y_1 - y_2)} = k_p. \quad (10.14)$$

Изложенное показывает, что (10.13) является одним из возможных решений (10.12) и что (10.14) можно использовать при расчете ординат проектируемого чертежа.

Из (10.13) и (10.14) получаем

$$y_1 - y = \frac{k_2 - 1}{k_2 - \delta_1} (y_1 - y_1)$$

и

$$y - y_2 = \frac{k_2 - 1}{k_2 - \delta_1} (y_2 - y_2)$$

или

$$y = y_2 - k_2 (y_2 - y_1) = k_2 y_1 + (1 - k_2) y_2. \quad (10.15)$$

Таким образом, любая ордината y нового теоретического чертежа с коэффициентом полноты δ может быть получена при выборе двух чертежей с большими и меньшим коэффициентом полноты, приведенных с помощью аффинного преобразования к размерам проектируемого судна. Пересчет ординат y удобно производить в табличной форме, взяв за основу выражение (10.15). Естественно, что чертеж в этом случае будет согласованным, построенным по заданным δ и V .

Полученный теоретический чертеж будет иметь следующие элементы: объемное водонизмещение $V = \delta L \delta T$; площади ВЛ (исчислены строковой по ВЛ) $S_L = k_2 S_{L1} + (1 - k_2) S_{L2}$; площади шпангоутов (ординаты строковой по шпангоутам) $S_{i1} = k_2 S_{i1} + (1 - k_2) S_{i2}$; коэффициенты полноты КВЛ $\alpha = k_2 \alpha_1 + (1 - k_2) \alpha_2$; коэффициент полноты мидель-шпангоута $\beta = k_2 \beta_1 + (1 - k_2) \beta_2$.

Используя (10.15), можно получить формулы для новых моментов инерции площадей, статических моментов площадей и объемов, метacentрических радиусов, абсцисс и аппликат ЦТ площадей и объемов. Эти формулы будут иметь относительно сложную структуру, и поэтому в большинстве случаев вместо них надо будет либо производить расчеты по новым ординатам обычными приближенными способами, либо применять приближенные формулы, коэффициенты в которых получаются интерполяцией.

Приводим здесь приближенные формулы

$$\rho = k_p \frac{\alpha^2}{\delta} + \frac{\beta^2}{127},$$

$$\text{где } k_p = k_p k_{p1} + (1 - k_p) k_{p2};$$

$$R = k_R \frac{\alpha^2}{\delta} + \frac{L^2}{127},$$

$$\text{где } k_R = k_p k_{R1} + (1 - k_p) k_{R2};$$

$$r_p = k_r \{\alpha(\alpha - \delta)\},$$

$$\text{где } k_r = k_p k_{r1} + (1 - k_p) k_{r2}.$$

250

Интерполяционный способ применяется для создания серий теоретических чертежей и пригоден для ведения расчетов на ЭВМ. Так, в Николаевском кораблестроительном институте под руководством А. Н. Вазилецкого была разработана соответствующая программа.

10.3. Перестроение чертежа судна-прототипа на основании строковой по шпангоутам проекта

Построить теоретический чертеж проектируемого судна можно, имея теоретический чертеж прототипа, размеры которого аффинно преобразованы к размерам проекта, строковую по шпангоутам та-



Рис. 10.12. Перестроение теоретического чертежа проекта (δ, k_p) из чертежа прототипа (δ_1, k_{p1}).

кого чертежа, а также строковую по шпангоутам проектируемого судна. При этом форма и, следовательно, коэффициент полноты шпангоута наибольшего сечения остаются неизменными. Строковая по шпангоутам проекта выполняется, например, способом, описанным в 10.3.

Вымертая обе строковые на одном листе, можно установить, насколько надо перенести шпангоуты прототипа, чтобы они образовали теоретический чертеж проекта. Например, площадь π_1 шпангоута чертежа прототипа на рис. 10.12 равна площади π_2 шпангоута проекта, т. е. ее величина, а следовательно, и ордината изогнутки должны быть связаны по величине Δx . При таком совпадении всех шпангоутов получим строковую проекта. В резуль-

таке изменится и любая ватерлиния (см. рис. 10.10). Ордината ватерлинии, находящаяся в плоскости пересечения шпангоута, сместится вдоль оси x на тот же отрезок, что и сама плоскость шпангоута.

Таким образом, получим полушпарты нового чертежа (см. рис. 10.10). Остается лишь снять с вычерченных ватерлиний ординаты, соответствующие равномерной сетке шпангоутов, построить корпус, а затем и бок проектируемого чертежа.

При тщательном перестроении ватерлинии чертеж окажется практически согласованным. Для увеличения точности построения рекомендуется для строевой принять такой масштаб, при котором отрезок, выражающий площадь шпангоута наибольшего сечения,

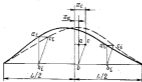


Рис. 10.13. Перестроение строевой при изменении положения центра тяжести x_c , x_c' — абсциссы ЦВ проекта и прототипа.

был равен приблизительно половине отрезка длины судна. Для ватерлиний желательно так изменить масштаб, чтобы отрезок $B/2$ равнялся примерно половине отрезка L .

В ряде случаев нужно только изменить положение ЦВ по длине судна, что достигается довольно простым преобразованием строевой (рис. 10.13). Для решения этой задачи нужно так изменить строевую по шпангоутам прототипа, чтобы площадь ее, т. е. водозащипание, осталась неизменной. Следует отложить по горизонтали от ЦТ площади строевой прототипа отрезок $(x_c - x_c')$, а точку a , соединяющую с ЦТ площадь строевой прототипа, соединить с точкой b на оси x . Любая точка строевой проекта получится путем перемещения точки a_1 в точку b_1 (см. рис. 10.13), причем cb параллельна cb' .

Теоретический чертеж перестраивают таким же путем, как для более общего случая.

Верхняя часть остовные ЦТ площади y_c от оси x можно рассчитать по ординатам строевой S_x или по приближенной формуле, в основу которой положена преобразованная формула Эйлера для

положении ЦВ по высоте. Эта формула в данном случае будет иметь вид

$$S_x = S_{\text{max}} \frac{y}{1+y}$$

Доказать правильность способа преобразования строевой по шпангоутам при перемещении ЦВ можно, если считать площадь строевой постоянной, а подложка ее ЦТ измененным в результате описанного выше преобразования строевой.

10.9. Построение судовой поверхности по одному аналитическому выражению. Параболический метод

Идея построения всего теоретического чертежа по одному аналитическому выражению, по двум выражениям (отдельно для носа и кормы) или по трем (добавляется цилиндрическая вставка) является весьма заманливой. Однако осуществить ее трудно, поскольку в подобные аналитические выражения должны входить проектные характеристики, которые получены в результате определения главных размеров судна, коэффициентов полноты и т. п. Учесть главные размеры и в аналитическом выражении теоретического чертежа можно, но учесть коэффициенты полноты, а также зависящую от высоты длину судна довольно сложно.

В наиболее простом случае описать параболические обводы судовой поверхности можно, составив два аналитических выражения: для носа и для кормы.

В соответствии с данными о параболической строевой по ВЛ, приведенными в 6.8, имеем:

$$S_{\text{max}} = k_0 z^2 = S_x (z/T)^{2\alpha} \Delta z^{-1} = \alpha_0 L_0 B (z/T)^{\alpha} \Delta z^{-1},$$

где S_{max} — площадь носовой части ВЛ на расстоянии z от ОП.

Ординаты ватерлиний в плоскости шпангоута наибольшего сечения: $y_{\text{max}} = c_1 z^m$ при $z = T$; $y_{\text{max}} = B/2 = c_2 T^n$; $c_1 = -B/2T^m$; $B = 2 c_2 T^n$.

Площадь шпангоута наибольшего сечения

$$S_{\text{max, max}} = \beta VT = 2 \int_{z=0}^{z=T} y_{\text{max}} dz = 2c_1 \int_0^T z^m dz = 2c_1 \frac{T^{m+1}}{m+1} = \frac{\beta T}{m+1}.$$

Отсюда $\beta = 1/(m+1)$; $m = (1/\beta) - 1$ и $y_{\text{max}} = (B/2) (z/T)^{1/\beta-1}$. Коэффициент полноты любой ВЛ в носовой части

$$\alpha_0 = \frac{S_{\text{max}}}{2L_0 y_{\text{max}}} = \frac{2\alpha_0 L_0 B (z/T)^{\alpha} \Delta z^{-1}}{2L_0 B (z/T)^{1/\beta-1}} = \alpha_0 (z/T)^{\alpha} \Delta z^{-1/\beta}, \quad (10.16)$$

При параболических ватерлиниях любая ордината y при любой абсциссе x будет:

$$y = y_{\text{квал}} \left[1 - \left(\frac{x}{L_{\text{квал}}} \right)^{2n} \right]^{1-n}$$

или

$$y = \frac{h}{2} \left(\frac{z}{T} \right)^{1+n-1} \left[1 - \left(\frac{x}{L_{\text{квал}}} \right)^{2n} \right]^{1-n} \quad (10.17)$$

где α_{2n} берется из (10.16).



Рис. 10.14. Наклонный параболический ватерлинии.



Рис. 10.15. Смена осевой линии ватерлинии.

Это общее аналитическое выражение (10.17) позволяет построить теоретический чертеж для носовой части судна с заданными размерными $L_{\text{квал}}$, B , T и коэффициентами полноты $\delta_{\text{квал}}$, α_n и β .

Значение $L_{\text{квал}}$ будет неизменным лишь в том случае, если формулы вертикальные. При других соотношениях формулы и формулу (10.17) следует проводить функцию $L_{\text{квал}} = f(T)$. Например, при наклонном формуле (рис. 10.14)

$$L_{\text{квал}} \approx L_{\text{квал}} \cos \alpha - \left(1 - \frac{z}{T} \right) \Delta L_{\text{квал}} \quad (10.18)$$

Таким же образом можно построить поверхность кормовой оконечности судна. На графике чертежа возьмем лишь направление оси на противоположное.

Изменение $L_{\text{квал}}$ в кормовой части учитывается аналогично изменению в носовой $L_{\text{квал}}$. Например, при ахтерштевне, имеющем форму, изображенную на рис. 10.15,

$$L_{\text{квал}} = L_{\text{квал}} - \Delta L_{\text{квал}} \cos \frac{\pi}{2} \frac{z}{T} \quad (10.19)$$

Приведенные выше формулы позволяют построить подводную и надводную поверхности, основанные на параболических ватер-

линиях и параболической строевой по ватерлиниям, т. е. с учетом коэффициентов полноты.

Недостатком этих поверхностей является отсутствие в них точек перегиба ватерлинии, что уже неоднократно отмечалось. Кроме того, форма шпангоута наибольшего сечения отличается от тех, которые обычно применяются.

Выше было рассмотрено судно без цилиндрической вставки корпуса. Анализировав суда с такой вставкой, нужно добавить к выражениям для носовой и кормовой частей выражение и для нее. О ряде других попыток выразить судовую поверхность аналитически — см. 10.2.

10.10. Лучевой метод Г. Е. Павленко

Наиболее оригинальной из всех попыток создать общее уравнение для судовой поверхности является, по-видимому, лучевой метод академика АН УССР Г. Е. Павленко. Основой данного метода является изображение ватерлиний, шпангоутов и батоксов в виде прямых линий на одной плоскости.

Для того чтобы уяснить принципы такого построения теоретического чертежа, рассмотрим рис. 10.16. Выше прямой $O'A$ изображен лучевой теоретический чертеж, ниже — обычный теоретический «корпус». Шпангоуты лучевого чертежа изображаются прямыми, исходящими из точки O' . Его ватерлинии — прямыми, исходящими из точек A , P и т. д., спроецированными с обвода шпангоута наибольшего сечения на $O'A$. Эта линия соответствует шпангоуту наибольшего сечения на обычном чертеже. Расположение точек прилегающей ватерлинии и ней можно найти аналитически по выражению для шпангоута наибольшего сечения $y_{\text{квал}} = f_0(z)$.

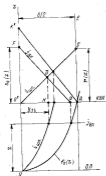
Расстояние между параллельными прямыми $O'K'$ и AE равно полуширине судна по конструктивной ватерлинии.

Расстояние $O'F$ между точкой пересечения лучевой ватерлинии с $O'K'$ и $O'O'$ есть функция $S_0(z)$. Отрезки Ag , образующиеся при пересечении лучевых шпангоутов с AE , зависят от положения шпангоутов по длине судна и могут быть выражены как функции z (или x), которую Г. Е. Павленко назвал радиантой. Из рассмотренных пары подобных треугольников $\Delta O'PF$ и ΔHPD ; $\Delta gO'A$ и $\Delta DO'H$, получаем выражение для ширины судна

$$y = \frac{h(z)}{1 - \frac{c(z)}{(S(z) + 0)}} \quad (10.20)$$

где $h(z)$ — тангенс угла наклона лучевых ватерлиний к $O'A$ (эту величину Г. Е. Павленко назвал дирохростом).

Зная ширину судна, обвод шпангоута наибольшего сечения, радианту и дирохрост, можно получить общее выражение для судовой поверхности.



Для того чтобы получить чертеж с заданными характеристиками, пользуясь таким способом, требуется большая предварительная работа, в ходе которой нужно установить связи между радиантами, директрисами и интересующими проеканта коэффициентами полноты. Эта работа была начата рядом авторов, однако не была доведена до конца. Известно, что задавались директрисом по законам прямой линии, парабола и гиперболы разного вида. В основу радианта закладывались некоторые тригонометрические функции. Однако в настоящее время можно использовать лучевой чертеж, так как он позволяет учесть плавность судовой

Рис. 10.16. Построение теоретического чертежа лужным способом.

поверхности в согласованности теоретического чертежа, заменив радианты и директрисы другими функциями (графическими или аналитическими), связь которых с формой судовой поверхности более проста.

Действительно, вместо того чтобы задавать $\delta(z)$ и $r(x)$, можно для каждой окрестности взять баланс-шпангоут (см. 10.5) и нанести его на лучевой чертеж (рис. 10.16).

В этом случае порядок действий будет следующим.

1. Принимают стрелую по шпангоуту, удовлетворяющую заданным (φ, x, φ и в некоторых случаях точку перегиба). Она может быть получена, например, перестроением стрелой прототипа и т. д.
2. Строят конструктивную ватерлинию, удовлетворяющую заданным ($\delta, \alpha_1, \alpha_2$), любым из описанных ранее способов.
3. Строят носовой и кормовой баланс-шпангоуты (3-й и 17-й); площадь их определяет по стрелой по шпангоутам, ординаты на КВЛ берут по ее обводу.
4. Наносят ординаты баланс-шпангоута и конструктивной ватерлинии на чертеж корпуса (аналогичный рис. 10.16, но изображающий носовую и кормовую часть судна).
5. Проводит лучевую конструктивную ватерлинию, на которой отмечают точки пересечения ее с лучевыми шпангоутами (точки пересечения имеют ординаты δ_{11}, δ_{12} и т. д.). Из точки O' через них проводят лучевые шпангоуты. На лучевом баланс-шпангоуте

отмечают точки пересечения его с другими ватерлиниями. Через точки, соответствующие полуширине шпангоута на шпангоуте наибольшего сечения, и через точки пересечения лучевых ватерлиний с лучевыми баланс-шпангоутами проводят все лучевые ватерлинии. Эту операцию проводят отдельно для носа и кормы.

Следует отметить, что ординаты пересечения ватерлиний и шпангоутов δ_i одинаковы на корпусе облоного чертежа и на лучевом чертеже.

6. Перенос ординат точек пересечения с лучевого чертежа на облоный позволяет получить согласованный теоретический чертеж. Его характеристики следует проверить обычным расчетам, вычеркнуть остоимость и согласовать прикладные ватерлиний к шпангоутам.

Из приведенных примеров видно, что составить аналитические выражения для поверхности судна, даже отдельно для носа и кормы, удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к форме позадной части судна, довольно трудно.

Метод Павлова, замышлявшийся как универсальное средство выражения судовой поверхности тремя уравнениями, получил практическое применение в измененном виде как способ графического построения согласованного теоретического чертежа по четырем сечениям (шпангоут наибольшего сечения, конструктивная ватерлиния, носовой и кормовой баланс-шпангоуты).

11.1. Значение и область применения научного аппарата теории проектирования судов. Использование научного аппарата других кораблестроительных дисциплин

В предыдущих главах рассматривались зависимости между проектными характеристиками судна, которые необходимы для решения основных вопросов его проектирования. Это — прежде всего вопросы нагрузки судна (гл. 1 и 2), определения его водоизмещения и главных размеров (гл. 3 и 4), его вместимости (гл. 5), формы (гл. 6 и 10), обеспечения нужных характеристик остойчивости и плавности качки (гл. 7), запаса плавучести и величины надводного борта (гл. 8), ходкости (гл. 9).

Решение совокупности этих вопроса с учетом взаимных влияний, т. е. при системном подходе, и дает возможность создать проект судна, представляющего собой сложную техническую систему. Такие проектные характеристики этой сложной системы могут быть разбиты на две категории.

К первой категории относятся характеристики судна, которые фиксируются в задании и нормах. В задании указываются технико-экономические (или тактико-технические) требования к ходкости судна (скорости), его дешевизне или чистой грузоподъемности, вместимости (например, удельной вместимости) и т. д. [57, 91]. Действующие нормы требуют обеспечения определенных характеристик остойчивости, мер по охране внешней среды и т. д. В некоторых случаях требования нормы (иногда с преамбулами) могут вводиться и в задание.

Ко второй категории относятся характеристики, определяемые проектными расчетами для удовлетворения требований задания и норм, а именно: характеристики размеров и формы судна (водоизмещение, главные размерения, коэффициент общей полноты, другие коэффициенты полноты и т. д.), мощность ЭУ.

Следует учитывать, что четкой связи между обеими категориями характеристик проекта не всегда. Так, например, иногда по условиям продолжения через шлюзы могут быть заданы главные размерения судна, вместо скорости в задании в некоторых случаях может быть включено требование об установке конкретной ЭУ, т. е. зафиксирована ее мощность. При этом главные размерения и мощность будут характеристиками первой категории, а скорость — второй категории.

И все же указанное выше разделение проектных характеристик на две категории следует считать типичным.

Формулы, выражающие зависимость характеристик второй категории от зависимостей первой категории или от других зависимостей второй категории, не должны давать, как правило, однозначных решений. Эти формулы позволяют установить некоторую среднюю величину и меру ее колеблемости (наибольшее или среднее квадратическое отклонение от средней величины).

Такой вероятностный характер формул теории проектирования судна определяет возможность разнообразных решений при определенных характеристиках судна даже при абсолютно одинаковых требованиях к нему задания и норм [37, 42, 43, 68]. В связи с этим следует уделить особое внимание статистическим данным, которые могут быть использованы при формализации характеристик проектируемых судов.

В факте разнообразия проектных решений усматривается и возможность оптимизации проекта.

При создании формул теории проектирования судов пытаются, как правило, взять в основу их какую-либо физическую (в частности, геометрическую) зависимость и путем ее приспособления к решению поставленного вопроса дать приближенную формулу для расчета искомых характеристик. В некоторых случаях применяется и прием обработки статистики в возможно простых аналитических формах (см. 6.1).

В процессе проектирования кроме нахождения проектных характеристик второй категории играют роль и вопросы определения архитектурно-конструктивного типа судна. Решения его многообразны. Так, может быть принято размещение ЭУ (к тому же разного типа — турбина, дизель) и впрямь, среднее или прожекторное (см. 5.7); судно может быть одновальным или многовальным; иметь двойное дно или не иметь его, быть одно- или двух- или многопалубным; может быть гладкопалубным или иметь ют и бак.

При проектировании судна, представляющего собой, как уже отмечалось, сложную систему, следует учитывать, что требования к нему в общем случае имеют противоречивый характер, а это заставляет принимать компромиссные решения. Примеры противоречивости требований к судну и к его свойствам многообразны. Особливости, познакомившись, увеличивает резкость качки. Увеличение данных быстроходных судов уменьшает мощность их механизмов, но увеличивает массу корпуса, ухудшает поворотливость, проходимость через каналы и т. д. Именно вследствие этого формулы теории проектирования судов имеют вероятностный характер. В то же время сами формулы указывают на пределы допустимого компромисса при отдельных решениях.

Таким образом, формулы теории проектирования судов, как имеющие вероятностный характер, основанные на статистических источниках и выраженные физических зависимостей, приближенные.

Полученная по ним математическая модель судна в итоге может содержать некоторые неточности. Однако именно эти формулы

позволяет перейти от требований к судну к его размерам и коэффициентам формы, создать его логико-математическую модель.

Кроме ряда конкретных арифметических значений самих элементов проекта, реализации логико-математической модели будет содержать ряд графических материалов: чертежи общего расположения, теоретический чертеж, набор модель-шангоута и т. д. Однако логико-математическая модель судна, основой которой являются приближенные формулы теории проектирования судов, может содержать, как уже указывалось, некоторые неточности, которые являются следствием неточности формул теории проектирования судов [23, 34, 68]. Поэтому логико-математическую модель судна следует подвергнуть проверке по точным формулам других кораблестроительных дисциплин. Эти формулы, пригодные для построения логико-математической модели, являются надежным средством выяснения свойств указанной модели. В результате может потребоваться исправление логико-математической модели. При этом наиболее рациональным способом исправления является расчет поправки по так называемым дифференциальным формулам теории проектирования судов [21, 22, 26, 27, 43]. Именитую в соответствии с этими расчетами логико-математическую модель судна можно подвергнуть вторично проверке по формулам прочих кораблестроительных дисциплин. Как правило, такая последовательность расчетов и графических операций позволяет получить приблизительную с точки зрения совместности всех ее данных логико-математическую модель судна. Правда, оптимальность такой модели остается недоказанной (пути установления ее оптимальности, т. е. оптимизации, изложены ниже).

Подобный метод проектных расчетов принято называть методом последовательных приближений, поскольку результат, получаемый сразу (первое приближение), может оказаться недостаточно точным и нуждается в исправлении (второе приближение), которое снова проверяется (третье приближение).

Метод последовательных приближений в многостранной практике называют способом попыток и ошибок (angle, trial and error method). В некоторых работах [14, 62] указывалось на возможность его чрезвычайного расширения за счет увеличения числа приближений. Однако при наличии надежных исходных данных, близости прототипа и т. д. процесс этот может быть завершен очень быстро.

Термин «метод последовательных приближений» иногда трактуется и в другом смысле.

Даже когда характеристики, полученные в первом приближении, подтверждаются последующими расчетами, надо уточнить другие детали проекта, которые не рассматриваются в техническом задании и в техническом предложении (предъезженном проекте), но уже в основном проекте играют существенную роль, например, расположение кают, направление внутренних коммуникаций — коридоров, трапов и т. д. Детализация общего расположения судна является приближением более низкого порядка, чем определение

его главных элементов, хотя при этом не требуется их корректировка и пересмотр ранее определенных величин.

Правдой того, что такое корабельное качество, как поворотность, обычно не учитывается в процессе определения главных размеров судна, является возможность обеспечить его при уже известных общих характеристиках судна без пересмотра их.

После получения одного (базового) варианта проекта могут быть созданы и другие варианты по главным элементам и архитектурно-конструктивному типу. Сравнительная оценка их достояния может послужить основанием для выбора окончательного варианта методом сопоставления выходящих вариантов, который известен под названием «метод вариаций».

Из сказанного выше можно сделать вывод о том, что формулы теории проектирования судна при проектировании отдельного судна (или серии однотипных судов) используются только до создания эскизного проекта. Однако часто на практике при утверждении эскизного проекта в него вносятся значительные изменения, по существу радикальные изменения характеристик первой категории. Иногда, естественно, приходится изменять и характеристики второй категории. Пересчет этих характеристик имеет смысл производить по формулам теории проектирования судов, а останком по упомянутым выше формулам дифференциального характера.

Характеристики технического проекта не должны изменяться, так как такое изменение в какой-то мере обесценивает материалы технического проекта, служащие для подготовки производства (ведомости заказа и т. д.). Однако, если все же предполагается изменение характеристик судна в техническом проекте, следует рассчитывать их по тем же формулам дифференциального характера теории проектирования судов.

Правильность определения главных размеров и формы на начальных стадиях проектирования позволяет при жесткой проектной дисциплине, обеспечивающей неизменность принятых характеристик, успешно спроектировать судно в соответствии с требованием и действующими нормами. Это соответствие проверяют на судочных испытаниях судна.

Однако даже судочные испытания не всегда достаточно для окончательного суждения о свойствах судна. Они могут быть оценены лишь по результатам его эксплуатации. Наконец, некоторые свойства судна, например непопадемость, можно окончательно проверить лишь в особых случаях.

Не следует забывать из виду, что даже при совершенно безупречном процессе проектирования судна, но при недостаточно обоснованном составленном задании на его проектирование судно может оказаться неудачным.

При произвольной выборке из справочников (банка данных) характеристик существующих судов, дане наилучших, добиться удачного проекта нельзя. Известны случаи, когда пытался принять, например, наибольшую скорость судна одного назначения, наибольшую грузоподъемность другого, наибольшую дальность

плавания третьего. Совершенно естественно, что водоизмещение судна, спроектированного по таким заданиям, оказывалось больше, чем у любого из используемых «прототипов», что обуславливало составителей задания.

При составлении задания на проектирование необходимо зреть совместимость отдельных требований, т. е. отсутствие противоречий между требованиями. Кроме того, даже при отсутствии противоречий между требованиями необходимо выяснить, является ли выдвигаемая совокупность требований (задание в целом) наиболее благоприятной, т. е. оптимальной.

Для определения совместимости и оптимизации требований задания применяют те же методические приемы, что и при установлении размерной и формы судна. Разница состоит в том, что основными переменными здесь являются не размеры или коэффициенты формы, а требования задания: скорость, грузоподъемность и т. д.

При работе над заданием основным является вопрос построения логико-математической модели судна, а не создания комплекта документации для его постройки. Поэтому в данном случае используют преимущественно методические приемы теории проектирования судов, которые позволяют рассчитать водоизмещение, мощность механизмов и состав основных разделов нагрузки и, следовательно, не переходят к более детальному проектированию судна, трудоемкость и стоимость постройки, размеры стальной, капитальные вложения в судостроительную промышленность, стоимость эксплуатации судна и тому подобные характеристики, необходимые для решения главных экономических вопросов создания судна.

Полюбой же подход, в котором фигурируют лишь самые общие проектные характеристики, позволяет без изготовления подобных проектов ставить и решать задачи оптимизации полевых составов цехов флотов, транспортных и промысловых [68, 70, 77, 78].

Решение этих задач дает возможность составлять обоснованные задания на проектирование серий судов, входящих в состав флота (та. 12).

11.2. Определение проектных характеристик судна

Научно-методический аппарат теории проектирования судов настолько разнообразен, что выбрать приемы, наиболее пригодные для каждого частного случая проектирования, одновременно и просто и сложно.

Обобщая частные случаи, встречающиеся при проектировании судна, эту задачу можно свести к несколько условной схеме, зависящей от наличия и характера исходной информации:

1. Имеются основные статистические данные по суднопрототипу, осуществленному в натуре или в проекте, основное назначение и характеристики которого близки к требуемым по заданию

на проектирование. Подробных данных о нагрузке и теоретическом чертеже прототипа нет.

2. Имеется подробный проект построенного судна и отчетные данные о его испытаниях и эксплуатации. Назначение судна и его основные характеристики близки к требуемым по заданию на проектирование.

3. Имеются задания (нах, скорое, пожелания) создать судно, которое по своему назначению или по каким-либо тактико-техническим или технико-эксплуатационным свойствам резко отличается от всех существовавших до сих пор.

В двух первых случаях можно говорить о наличии так называемого прототипа. В третьем случае, по-видимому, нужно говорить о проектировании судна *ab ovo* (лат.— от яйца), как говорил И. Г. Бубнов. Здесь прототипы могут быть использованы лишь частично.

«В действительности никто не проектирует судно *ab ovo*, в подавляющем большинстве случаев всякий пригодный для осуществления проект представляет лишь развитие, изменение или усовершенствование уже существующего типа; конечно, иногда обстоятельства заставляют делать очень крупные скачки, но хорошие результаты получаются при этом лишь в исключительных случаях», — писал И. Г. Бубнов [31, с. 244].

На наш взгляд, это высказывание несколько противоречно. С одной стороны, говорится о том, что никто не проектирует судно *ab ovo*, с другой, признается необходимость иногда делать крупные скачки и получать при этом, в исключительных случаях, хорошие результаты. Типичным примером такого скачка, окончательного не совсем удачно, является создание в 70-х годах XIX в. «шлюзов» — броненосцев береговой обороны с круглой ватерлинией.

В ряде других случаев при проектировании использовали даже готовый корпус, а иногда и ЭУ существующего судна совершенно другого назначения, т. е. принимали готовые размеры (кроме «садки») и форму, а затем приспособляли судно к новому назначению. Так, например, родились первые авианосцы в конце первой мировой войны, перестроенные из так называемых легколинейных крейсеров. Перестроенные корабли стали прототипом для следующих проектов авианосцев [56].

При переоборудовании кораблей основную роль играют непосредственные расчеты по готовым главным размерам и формулам, характерным для всех судостроительных дисциплин, кроме теории проектирования судна.

В третьем случае — при создании судов совершенно новых типов — чрезвычайно эффективна может оказаться предложенный И. Г. Бубновым «использованный» в отношении водоизмещения проектный набросок, который становится после математической обработки его промежуточным прототипом (см. 4.3, 4.5).

Методический аппарат теории проектирования судна в полном объеме применяется «в подавляющем большинстве случаев», когда

пригодный для осуществления проект представляет лишь разницу, наименьше или усовершенствование уже существующего типа.

Первые два случая постановки проектной задачи наиболее распространены на практике. Процесс решения задачи в этих случаях излагается ниже. Предполагается, что проектируемое судно должно быть более или менее близким к прототипам, имеющим упомянутые выше исходные данные, в частности его назначение. Если назначение изменится, то должно быть рассмотрено влияние этого изменения на характеристики судна.

До того как начать операции, описанные ниже, надо ясно представить себе архитектурно-конструктивный тип проектируемого судна. При необходимости рассмотреть несколько вариантов архитектурно-конструктивных типов нужно повторить все операции, соответствующие числу вариантов.

Рассмотрим первый случай.

1-я операция. Определение водоизмещения D и мощности энергетической установки N , а также нагрузки и верное приближение.*

По уравнению нагрузки в функции D и алгебраической форме определяют водоизмещение судна. При решении этой задачи учитывают потребные изменения параметров, входящих в уравнение масс (см. 3.2).

Параметры уравнения нагрузки, т. е. тактико-технические (технико-эксплуатационные) характеристики судна (скорость, дальность плавания, грузоподъемность или декейт), измерителя масс корпуса, механизмов и т. д., а также другие технические характеристики (коэффициент C в формуле для N), могут быть приняты в соответствии с назначением судна, по прототипу или по статистической информации, касающейся аналогичных судов.

Следует помнить, что резкое изменение этих характеристик по сравнению с обычными может привести к неприемлемому решению. Эта неприемлемость обнаруживается в результате расчетов.

Одновременно с определением водоизмещения по уравнению нагрузки находят приближенное значение мощности энергетической установки N . Величины, потребные для определения этой мощности, нужны и для решения уравнений нагрузки. Затем составляют таблицу нагрузки по основным разделам, после чего можно подсчитать ориентировочную стоимость постройки.

Привыкая в качестве основы для проектирования характеристики, требуемые заданием, надо четко представлять, какова сущность каждой характеристики. Если, например, задается акустативная скорость, то следует решить вопрос, какую скорость на испытании (см. 9.6) следует ввести в расчеты, а затем в проектную документацию (спецификацию проекта).

2-я операция. Определение главных элементов — главных размеров и коэффициентов формы.

Определяют относительную длину L по заданной скорости (см. 9.9). По относительной длине судна и его водоизмещению определяют длину судна L . Проверяют соответствие ее минимальным условиям (стабильности, причальным длинам, местам поворота стоянки, длине шлюзов и т. д.), а также требованиям к компоновке.

Определяют число $Ft = \sigma \sqrt{V \Delta}$ и по нему находят коэффициент общей полноты судна δ (см. 9.10), а затем коэффициент полноты миделя β (см. 6.4) и коэффициент продольной остроты φ . В зависимости от последнего устанавливают коэффициент полноты грузовой ватерлинии α (см. 6.6), а в зависимости от требований к жесткости $h_T = N/T$ (см. гл. 5). В некоторых случаях эту величину следует округлить, чтобы обеспечить достаточный запас плавучести (см. 9.1). Значение N выбирают и по условиям общего расположения судна, например, в зависимости от потребной высоты машинно-котельного отделения (и проверяют по потребной высоте надводного борта $H_{0,2} = H - T$, см. выше).

Выбрав значение β , можно определить отношение $\beta_1 = B/T$. Если ограничений для B и T по компоновке или эксплуатационным условиям нет, то β_1 можно принять по прототипу или по группе прототипов (если h_T и остойчивость должны остаться прежними) либо изменить с учетом изменения относительной метацентрической высоты \bar{h} и h_2 (см. 7.6).

Зная L , δ , β_1 , можно определить B и T (см. 4.1). Затем находят величину надводного борта (см. гл. 8) и приводят в соответствие величину надводного борта и h_2 . Для судна, надводный борт под действием Плавла о грузовой марке, величина надводного борта должна быть не меньше указанной в нх. Иногда, чтобы удовлетворить требованиям жесткости, высота надводного борта может быть больше высоты надводного борта, определенной по правилам (судна с избыточным надводным бортом). Затем определяют характеристики теоретического чертежа: положение ЦВ по длине, коэффициенты общей полноты, полноты носовой и кормовой частей δ_n и δ_k , коэффициенты полноты носовой и кормовой частей площади надстройки, длины заострений оконечностей, положение шпангоута наибольшего сечения (для быстроходных судов), длины и положение цилиндрической астиги для тихоходных судов (см. гл. 6 и 9).

3-я операция. Проверка соответствия определенных размеров и формы судна требованиям задания и норм. Корректировка размеров и формы проектируемого судна.

По данным, полученным выше, делают эскиз теоретического чертежа (см. гл. 10). По этому чертежу, который должен иметь заданные размеры, коэффициенты и, следовательно, водоизмещение, площадь ГВЛ, положение ЦВ по длине, определяют по методам теории корабля положение метацентра, а также строят кривые остойчивости формы (шпангоуты).

Уже при выполнении 2-й операции следует начать графические разработки общей компоновки судна (его общего расположения), что поможет проверить приемлемость принимаемых главных размеров судна, т. е. выяснить, позволяет ли длина судна L распо-

* По входящей в практику терминологии, 1-я операция — решение задачи высшего иерархического уровня, 2-я — следующего и т. д.

ловить необходимое оборудование и помещения. На научно-исследовательских судах надо разместить наблюдательную аппаратуру на заданной глубине, на пассажирских — создать условия комфорта для пассажиров; воспользуйтесь, например, для ширины судна B расположить оборудование и груз (например, на контейнеровозах нужно определить число рядов контейнеров), а также установить, соответствует ли полная высота борта H общей компоновке судна. Важно учитывать, достижима ли площадь шпангоутных сечений в оконечностях для размещения грузов и оборудования.

К концу 3-й операции проектировщик должен определить общую предварительную компоновку судна, т. е. создать комплект чертежей общего расположения.

Далее, используя теоретический чертёж, определяют осадность ЗУ по таблицам или графикам, полученным при систематических испытаниях серий моделей судов подходящей формы и соответствующих диаметров [47, 68], либо по результатам специальных испытаний модели судна.

Выполненные расчеты и эскизы помогают составить нагрузку судна с определением трех координат ЦТ каждого ее раздела. После этого можно удифференцировать судно (см. 5.7) и определить возможное несоответствие между водозмещением по теоретическому чертежу и по нагрузке, а также уточнить значение начальной метацентрической высоты.

Устранять несоответствие водозмещения или осадности можно, применяя дифференциальные методы.

Если величина составляет небольшую часть принятых запасов водозмещения и осадности, особенно когда величина увеличивается запас, можно откорректировать запас водозмещения и запас осадности и считать размерами и форму судна пригодными для дальнейшей разработки проекта. Если указанные величины значительны, то следует исправить размерами или форму проектируемого судна, стараясь устранить величину за счет наименьшего числа расчетных характеристик.

Затем, в случае необходимости, могут быть откорректированы таблица нагрузки, теоретический чертёж и схема общего расположения.

Полученные материалы вместе с установленными в ходе трех операций общими характеристиками судна берут за основу при дальнейшем проектировании, включающем выпуск рабочих чертежей. На всех последующих этапах проектирования расчеты ведут по методам, разработанным в различных кораблестроительных институтах, кроме теории проектирования судов (с огорками, приведенными выше).

3-я операция может осуществляться в большом или меньшем объеме.

После разработки теоретического чертежа и нагрузки в процессе выполнения 3-й операции может быть проверена осадность на больших углах крена, например для судов, поднимающих под действием Праща Регистра СССР об осадности (см. 7.8).

Расчетывают саму таблицу нагрузки довольно подробно. По набору мидели и эскизам других корпусных конструкций определяют массу этих конструкций.

Во втором случае процесс определения размеров и коэффициента полноты упрощается. Сразу рассчитывают дифференциальными методами изменение размеров и коэффициента общей полноты. Для этого удобнее использовать уравнение И. Г. Бубнова. При заданных исходных данных (достоверной информации) величина между нагрузкой и плавучестью будет неизменной, и ее можно устранить, изменив запас водозмещения.

Из сказанного следует, что число приближений зависит от полноты и достоверности данных по прототипу и от близости элементов задачи к элементам прототипа, а также от соответствия значениям проектируемого судна значениям судна-прототипа.

11.3. Оптимизация проекта. Метод сопоставления вариантов

Метод сопоставления вариантов открывает путь к оптимизации проекта по какому-либо критерию.

Установить оптимальный вариант можно, например, следующим образом.

1-я операция. Методами, описанными в 11.2, находят базовый вариант проекта, среднее значение относительной длины судна l и коэффициента полноты δ . Объемное водозмещение этого варианта — V .

2-я операция. Для указанного судна определяют возможные крайние значения величин l и δ по формулам в пределах $\pm \Delta l$ и $\pm \Delta \delta$ при данных скоростях и числах Фруда (см. та. 9). По наибольшему отклонению находят приближенное значение $\Delta L = -\Delta V \sqrt{g}$.

Таким образом, вычисляют крайние значения $L = L_0 + \Delta L$ и $L = L_0 - \Delta L$ и любое количество промежуточных значений L .

Для каждого значения L определяют число Фруда $Fr = v/\sqrt{gL}$ и соответствующий коэффициент полноты δ .

Сделав постоянными основные заданные величины, например v и Fr , для транспортное судна производят необходимые расчеты для каждого варианта, которые удобнее вести в табличной форме.

Теперь для каждого из вариантов необходимо определить главные размеры, водозмещение, нагрузку, мощность ЗУ, а также экстремальное значение критерия оценки варианта.

Могут встретиться случаи, когда в качестве постоянных следует принять не v и Fr , а B , T , H (в зависимости от приемлемых габаритов).

Как видно из предыдущего, количество вариантов, которые необходимо проанализировать для выбора оптимального, велико. Так, для оптимизации состава задачи может потребоваться варьирование скорости, грузоподъемности, дальности плавания и т. д.

ТРАНСПОРТНЫЙ МОМЕНТ С ДРЕВНЕЙШИХ ВРЕМЕН ДО НАШИХ ДНЕЙ

Тип судна	Год	Водоизмещение D , т	Скорость v , уз	Транспортный момент Dv т · уз
Древнегреческий корабль*	1000 лет до н. э.	40	2,0	80
Корабль викингов*	1000 г. н. э.	90	3,0	180
Колесер «Санта Мариа»*	1492	80	3,5	280
Корабль «Колумб»*	1493	3 000	4,5	13 500
Транзитное судно*	1900	8 000	8,0	64 000
Судно типа «Виктория»*	1845	16 000	16,0	256 000
Судно типа «Маринер»*	1955	30 000	20,0	400 000
Грузовый лайнер**	1966	21 000	20,4	430 200
Контейнеровоз**	1972	43 000	33,0	1 419 000
Танкер**	1973	300 000	15,0	8 400 000

* Данные заимствованы из Дювернуа.

** Данные автора.

Увеличению числа вариантов будет способствовать и рассмотрение вариантов по архитектурно-конструктивному типу судна. В таких условиях целесообразнее переходить на машинный счет. В этом случае могут оказаться полезными и специальные математические приемы (гл. 12).

Чем тщательнее разработка вопроса оптимизации, тем больше объем проектных расчетов, что вызывает стремление применить ЭВМ. Но все-таки следует ясно представлять себе, что основное значение машинный счет и связанное с ним специализированные математические приемы приобретают в двух случаях: при оптимизации состава флота и на стадии разработки технического проекта, рабочих чертежей, подготовки производства и самого производства.

Оба эти случая требуют объема вычислений несравненно большего, чем указанной в 11.3.

11.4. Критерии оценки проекта

Критерии для оценки вариантов могут быть выдвинуты различные. В известной мере в качестве таких критериев могут быть взяты размеры судна, его водоизмещение. При введении ограничений на размеры судна можно не рассматривать те варианты судна, размеры которых выходят за эти пределы, принятые в качестве ограничений (критериев).

Для экспедиционных, научно-исследовательских судов, военных кораблей в качестве критерия задания используют водоизмещение, так как для них грузоподъемность не играет большой роли (т. е. тоже принимают ограничения в качестве критерия).

И. Г. Бубнов предложил в качестве одного из возможных технико-эксплуатационных критериев приемлемости проекта использовать наименьшее допустимое значение водоизмещения [31].

Кроме того, можно применять критерий, выдвинутый К. С. М. Давидомом: транспортный момент Dv , где D — полная масса транспортного средства, v — его расчетная скорость.

В табл. 11.1 показано наименьшее значение момента Dv судов в процессе их развития почти за 2000 лет.

Желание достичь максимума Dv противоречит требованию о минимуме D . Увеличение D , как это будет показано ниже, положительно скажется на провозоспособности, т. е. на способности судна данного типа перевезти определенное количество соответствующего груза в единицу времени. В общем случае над грузом следует понимать ту часть загрузки судна, транспортировка которой определяет основное назначение судна. Для грузовых судов это — их полезная грузоподъемность P .

Совершенно ясно, что при данной грузоподъемности (полезной нагрузке) к другим требованиям к судну (скорость, дальность плавания) желательно иметь наименьшее водоизмещение.

Провозоспособность судна может рассматриваться как технико-эксплуатационный критерий оценки судна, хотя значение этого критерия зависит не только от характеристик судна.

Провозоспособность (годовой) судна (т · мили)

$$Q = P \tau v_0$$

где P — средняя масса одновременно перевозимого груза, т; t — ходовое время за год, ч; v_0 — средняя ходовая (эксплуатационная) скорость, уз.

Учитывая, что $P = \eta_P P_0 = \eta_P \eta_D D$, $t = 8760 \eta_t$, где η_P — коэффициент использования полного годового времени; 8760 — число часов в году; η_D — коэффициент использования чистой грузоподъемности; $v_0 = \eta_v v$, где v — расчетная скорость (скорость на испытаниях); η_t ; η_D — коэффициент использования скорости, имеем

$$Q = 8760 \eta_D \eta_D v_0 \quad (11.1)$$

где η_D — коэффициент использования транспортного момента.

Коэффициент использования (utiлизации) транспортного момента

$$\eta_D = \eta_P \eta_D \eta_v \quad (11.2)$$

где η_P — коэффициент использования чистой грузоподъемности при эксплуатации; η_D — коэффициент использования водоизмещения по чистой грузоподъемности; η_v — коэффициент использования расчетной скорости (скорости на испытаниях); η_t — коэффициент использования времени.

Последний коэффициент зависит от времени пребывания в течение года в портах t_p и в ремонте t_r :

$$\eta_t = \frac{8760 - t_p - t_r}{8760} = 1 - \frac{t_p + t_r}{8760} \quad (11.3)$$

Значение t_2 зависит прежде всего от нормы грузовых работ, значение t_2 — от надежности корпуса и механизмов судна, от его ремонтоспригодности. О коэффициентах η_1 и η_2 говорилось в 1.5 и 9.6.

Коэффициент использования (утилизации) η_3 частой грузоподъемности зависит от степени загрузки судна, которая, в свою очередь, зависит от удельного погрузочного объема груза, его партияности. При высоком значении удельного погрузочного объема уменьшается η_3 , что приводит к недогрузке судна. Кроме того, значение этого коэффициента зависит от наличия груза в порту погрузки и даже в какой-то степени от конкурентоспособности судна.

Составители формул (11.1) и (11.2) не являются независимыми друг от друга. Так, η_3 может уменьшиться при увеличении v . В то же время при увеличении v может повыситься η_3 , так как быстротходный грузовой судан оддают предпочтение при фрахтовании перед более тихоходным, т. е. менее конкурентоспособным.

Проанализированный эксплуатационно-технический критерий пригоден для оценки грузовых судов. Для судна иного назначения могут быть предложены другие критерии. Например, для промышленных судов им может быть годовой производительность судна, выраженная массой добываемой за год продукции.

Все приведенные выше критерии оценки оптимальности судна не учитывают чисто экономических показателей. Однако основными критериями, по которым выбирают оптимальный вариант, являются критерии, связанные со стоимостными характеристиками постройки и эксплуатации судна.

В СССР экономическую эффективность гражданских судов оценивают по критериям, основанным на рекомендациях «Тизовой методики определения экономической эффективности капитальных вложений», принятой Госпланом, Госстроем и АН СССР. Такая оценка предусматривает сопоставление эффекта, текущих затрат и капитальных вложений. Под капитальными вложениями K понимают стоимость постройки судна (с учетом затрат на проектирование, подготовку и освоение производства). Текущие затраты S (или эксплуатационные расходы) представляют сумму годовых расходов на топливо, заработную плату экипажа, текущий ремонт и др. Под эффектом понимается годовой объем выполняемой судном работы. Для грузового судна этот объем в натуральном исчислении есть провозная способность Q или, в денежном выражении, — годовой доход от эксплуатации судна P_1 .

При проектировании судов оценивают общую (абсолютную) и сравнительную экономическую эффективность судна.

Критерием общей эффективности является отношение годовой прибыли к капитальным вложениям

$$s = \frac{P_1 - S}{K}$$

или срок окупаемости капитальных вложений

$$t = \frac{K}{P_1 - S}$$

Наилучшим из сравниваемых судов является то, которое характеризуется $S_{\text{мин}}$ или $t_{\text{мин}}$.

Критерием сравнительной экономической эффективности является абсолютная величина приведенных затрат S_p , которые представляют собой сумму текущих затрат, и доли $E_{\text{влож}}$ капитальных вложений: $S_p = S + E_{\text{влож}} \cdot K$, где $E_{\text{влож}} = 0,12$ — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений.

Сравнение двух судов, имеющих разные эксплуатационно-технические характеристики по приведенным затратам, может оказаться неубедительным. Поэтому анализируют приведенные затраты, отнесенные к единые единице эксплуатационной характеристики.

Для грузовых судов принимают относительные приведенные затраты

$$S'_p = (S/Q) + E_{\text{влож}}(K/Q)$$

При расчете приведенных затрат по грузовым судам, предназначенным для эксплуатации на заграничных линиях, объем работы измеряют в единицах инвалютного дохода за перевозку грузов на этих линиях. В этом случае приведенные затраты относятся не к 1 т перевозимого груза, а к единице чистого инвалютного дохода (за вычетом инвалютных расходов по эксплуатации судна).

Расчет этой величины для различных вариантов проектов грузовых судов позволяет выбрать оптимальный вариант судна, который будет осуществлять перевозки между иностранными портами.

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЕКТИРУЕМЫХ СУДОВ НА БАЗЕ МАТЕМАТИКО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МЕТОДОВ

12.1. О необходимости применения ЭВМ и математических методов оптимизации проектируемых судов

Современное судно является сложной системой, состоящей из ряда взаимосвязанных подсистем. Одновременно каждое судно есть элемент еще более сложных транспортных, промышленных и других систем. Проектирование судна становится невозможным в отрыве от решения систем более высокого уровня. Поэтому характерной тенденцией современного процесса проектирования является расширение круга проектных задач.

Так, проектиant выполняет обоснования с целью определение целесообразности создания данного конкретного судна либо комплекса совместно работающих судов. Большой потенциальный эффект дает оптимизирующие элементы флота в целом при формировании перспективных судостроительных программ. Прогнозирование пополнения флота выходит за рамки одной отрасли. Учетная судостроительная в определении путей оптимального пополнения флота можно рассмотреть в двух аспектах. Такая задача должна решаться с учетом состояния и перспектив развития судостроительного производства, которая, в свою очередь, должна определяться с учетом перспектив развития флота. Следовательно, это — комплексная народнохозяйственная проблема.

Возможность качественно нового решения проблемы оптимизации судов открылась в связи с появлением мощной вычислительной техники и благодаря успехам в развитии современных численных методов решения сложных математических задач — задач математического программирования. Существенным является тот факт, что внедрение математико-вычислительных средств для решения оптимизационных задач является способом повышения эффективности проектируемых судов, создаваемых изделий, как правило, без дополнительных капитальных вложений, т. е. одним из самых эффективных путей повышения производительности труда. Из этого следует, что оптимизирующие целесообразно осуществлять на всех этапах и стадиях проектирования, независимо от размеров потенциального эффекта.

Прежде единственным методом оптимизации судов являлся интуитивный метод, наиболее существенным преимуществом которого является его наглядность. Проектиant имеет возможность

отобразить допустимые варианты судна, т. е. удовлетворяющие одновременно закону Архимеда, требованиям к скорости, вместимости, удельной мощности, устойчивости и другим, и оценить приемлемость этих вариантов по избранному критерию эффективности. Так, оптимизируя коэффициент общей полноты δ и относительную ширину судна B/T , достаточно рассмотреть 16 вариантов судна (с четырьмя значениями δ и четырьмя значениями B/T при каждом δ). Выполняя необходимые графические построения, получим область допустимых вариантов и значение критерия эффективности для всех вариантов (в данном случае значение приведенных затрат на 1 т перевозимого груза). Окончательный, т. е. оптимальный, вариант судна можно выбрать по минимуму приведенных затрат. Если же у проектианта есть основания отказать от этого варианта, то он может выбрать «направление отступления» с односторонней оценкой assessорных последствий для эффективности судна и его качества.

Удобство и наглядность вариативного метода проявляются при числе оптимизируемых элементов не более трех. При большем числе трудность расчетов и графических работ резко возрастает и, главное, затрудняется анализ результатов. Такое положение объясняется в первую очередь неравномерностью организации расчетов, а именно необходимостью расчета всей предварительно заданной совокупности вариантов без учета результатов, полученных по каждому очередному из них. Поэтому большинство расчетных схем этого метода предусматривает оптимизацию только двух-трех элементов судна. Как правило, это — коэффициент общей полноты, относительное удлинение и отношение ширины судна к осадке. Трудность вариативного метода объясняется в определенной мере и приближенным характером зависимостей, которые используются для расчета масс, вместимости, устойчивости, скорости и других характеристик, что будет рассмотрено дополнительно.

Попытки уменьшить числа оптимизируемых элементов и применить более точные методы расчета привели к использованию специальных математических средств и ЭВМ для установления допустимых и оптимальных вариантов. При этом в определенной последовательности создаются варианты проектов судов, причем каждый последующий вариант формируется только по результатам расчета предыдущего. Так, оптимизируя δ и l , на очередном шаге процесса оптимизации прием $\delta_{i+1} = \delta_i + \Delta\delta_{i+1}$, $l_{i+1} = l_i + \Delta l_{i+1}$, при этом знаки и величины $\Delta\delta_{i+1}$, Δl_{i+1} определяются в зависимости от того, какими были критерий эффективности и качества судна в предыдущем варианте, т. е. при $\delta = \delta_i$, $l = l_i$.

Математические методы решения оптимизационных задач являются предметом специальной математической дисциплины — систематического программирования. В общем виде задача математического программирования формулируется так: определить такой вектор неизвестных x , чтобы критерий

$$f(x) \rightarrow \min (\max) \quad (12.1)$$

и неизвестные могут принимать значения в области, описываемой системой ограничений типа

$$B_0(x) \geq b_0, \quad \forall x \in S, \quad (12.2)$$

где x — множество всех ограничений, образующих область допустимых решений.

В задачах теории проектирования составляющие вектора x могут быть оптимизируемые характеристики и элементы судна, критерием — приведенные затраты, отнесенные к объему выполняемой судном работы, уровень рентабельности в виде отношения прибыли от эксплуатации судна к стоимости его постройки, ограничениями — уравнение масс (аналитическое выражение закона Архимеда), требования к скорости, дифференту, вместимости, остойчивости и др.

Работоспособность организации вычислительного процесса не является единственным достоинством математических методов оптимизации. Решение задач теории проектирования в формулировке (12.1), (12.2) позволяет создать ряд оптимальных вариантов судов, эксплуатация которых будет возможна при различных внешних условиях. Таким образом, открывается возможность исследования устойчивости оптимальных решений, принимаемых проектантом, по существу, в условиях неопределенности обстановки, в которой будет работать судно в течение 20—25 лет.

Формулировка задачи проектирования в виде (12.1), (12.2), кроме того, дает возможность описать качества судна с помощью неравенств. Дело в том, что большинство уравнений теории проектирования являются параметрически зависимыми — она содержит параметры, рекомендуемые значения которых могут быть указаны лишь в виде допустимого диапазона. Например, уравнение остойчивости позволяет определять отношение ширины к осадке и функции ряда элементов судна и относительной начальной метacentрической высоты. Последняя, хотя и не выходит за рамки известного диапазона от минимально до до максимально допустимого, но может в принципе принимать любые значения внутри этого диапазона.

Таким образом, задав требования к начальной остойчивости в виде системы двух неравенств, можно существенно расширить область поиска оптимального варианта.

Вводные современных вычислительно-математических средств в сферу творческой деятельности проектантов требует решения многих сложных вопросов. Это прежде всего организационно-психологические вопросы, а также вопросы формализации постановок проектных задач, построения адекватных математических моделей, разработки эффективных численных методов, в частности алгоритмов оптимизации в нелинейных задачах, создании программных комплексов для ЭВМ.

Далее излагаются некоторые обобщения, положения оптимизации проектирования судов, а также приводятся примеры математических моделей оптимизации их элементов и характеристик [67, 68].

12.2. Методы оптимизации элементов судна

Модель оптимизации в форме Н. Г. Бубнова. На сегодняшний день известно много попыток решения задачи оптимизации элементов судна в математической формулировке, т. е. как экстремальной задачи математического программирования. Но еще задолго до появления этой, относительно новой математической дисциплины Н. Г. Бубновым был предложен оригинальный для своего времени метод оптимизации в линейной формулировке, который позднее был квалифицирован как новый направление в развитии теории проектирования судов. Этот метод был изложен им в докладе, прочитанном в 1916 г. в Обществе норвежских инженеров. Указанная работа Н. Г. Бубнова нашла свое дальнейшее развитие и отражение во многих учебниках и учебных пособиях. Однако меньшего внимания удостоена та ее часть, в которой задача определения размеров судна сведена к минимизации некоторой функции — критерия при выполнении двух условий-ограничений: уравнений масс и начальной остойчивости. Рассмотрим эту формулировку подробнее.

И. Г. Бубнов исходил из того, что размеры судна должны обеспечивать прежде всего выполнение закона Архимеда и получение надлежащей остойчивости (начальной метacentрической высоты). Однако прямое составление уравнений масс и остойчивости при отсутствии теоретического чертежа и чертежей расположения составных нагрузок (особенно массы механизмов и тоннажа) и весовых метacentры и ЦТ от размерных и интегральных параметров формы корпуса. В то же время он исходил из того, что в большинстве случаев при проектировании имеется судно-прототип с достаточно детальной проектной документацией. Поэтому исходная задача определения элементов проектируемого судна была заменена им задачей нахождения таких приращений размерностей судна-прототипа, при которых можно получить наименьшие водоизмещение или стоимость либо положение эксплуатационных расходов нового судна. Модель такой задачи можно записать в виде

$$dD, dK \text{ либо } d(C+EK) \rightarrow \min, \quad (12.3)$$

$$d\left(\sum_i P_i + P\right) = dD, \quad (12.4)$$

$$dh = dh_n - dh_q. \quad (12.5)$$

Здесь первое условие отражает требование минимизации приращений водоизмещения D , стоимости постройки K либо приведенных затрат $(C+EK)$, измененных в то время эксплуатационными расходами C вместе с процентами E на первоначальную стоимость судна K . Второе и третье условия — уравнения масс и начальной остойчивости, составленные в виде приращений по отношению к нагрузке и метacentрической высоте прототипа.

Возьмем для простоты за неизвестные размеры длину, ширину и осадку*, И. Г. Бубнов получил

$$n_1 dL + n_2 dB + n_3 dT \rightarrow \min, \quad (12.6)$$

$$\frac{\partial \left(\sum_i P_i \right)}{\partial L} dL + \frac{\partial \left(\sum_i P_i \right)}{\partial B} dB + \frac{\partial \left(\sum_i P_i \right)}{\partial T} dT + dP = D \times \\ \times \left(\frac{dL}{L} + \frac{dB}{B} + \frac{dT}{T} \right); \quad (12.7)$$

$$dK = k_L \frac{dL}{L} + k_B \frac{dB}{B} + k_T \frac{dT}{T} - dz_p. \quad (12.8)$$

Это и есть модель задачи оптимизации прототипа (длина, ширина и осадка судна-прототипа. (Значит модель дана в упрощенном элементаризированном виде по отношению к оригиналу.) Входящие в нее коэффициенты n , k и производные масс по размерам предложено рассчитывать по данным прототипа без изменения его размеров и форм корпуса, но с предельной корректировкой нагрузки, учитывающей отличие проектируемого судна от прототипа в исходных характеристиках, механизмах, устройствах и др. (подробнее см. в гл. 4). В результате указанной корректировки будут получены также приращения масс и возмущения ЦТ dP и dz_p . Величина dK — разность метрической высоты проекта и прототипа.)

В связи с линейным характером модели относительно некоторых переменных И. Г. Бубнов писал, что она «не может нам дать аналитического минимума и лишь указывает по направлению, в котором нужно идти при выборе размеров, чтобы получить те или иные выгоды; возможные же границы изменения размеров определяются уже другими соображениями» [31, с. 253—257]. В числе таких соображений им назывались условия:

$$\frac{dL}{L} + \frac{dB}{B} + \frac{dT}{T} \leq 0,10 + 0,15, \quad (12.9)$$

которые фактически связаны с линейным характером модели и отражают требование близости прототипа.

И. Г. Бубнов отмечал также, что в задании на разработку проекта может быть указано не одно значение метрической высоты, а верхний и нижний ее пределы. В этом случае соответствующее уравнение в модели оптимизации должно присутствовать для обоих пределов.

Нужно отметить, что модель И. Г. Бубнова являлась весьма близкой прототипом современных моделей оптимизации элементов, первые из которых появились спустя почти полвека после публикации упомянутого доклада. Данная работа, следовательно

* В принципе И. Г. Бубнов считал возможным изменять кроме главных размеров и параметры, характеризующие форму подводной части судна: коэффициент обвода полноты, коэффициент продольной полноты и др.

о приоритете в этой области, остается актуальной и сегодня в отношении оценки надежности расчетных зависимостей. Трудно не согласиться с выводами о том, что нельзя достаточно надежно рассчитать нагрузку, возникающую на мезентри в ЦТ судна только по главным размерам и коэффициентам полноты без теоретического черчения, учета момента составляющих нагрузок относительно основной, результатов модельных испытаний и других данных. Это особенно важно при оптимизации элементов судна в широком диапазоне их изменения, что вполне забывается при увлечении математической стороной вопроса.

Для расчетов нагрузки, начальной остойчивости, удифференциальным и тому подобным характеристикам, важных для определения элементов, нужна детальная информация о форме корпуса, расположении отсеков, размещении грузов и др., которую, однако, нельзя получить, не определяя элементов судна. Прототипичные осадки. Прежде предположить его выданы, опираясь на прототип и используя приближенные зависимости. Сегодня вычислительная техника позволяет перейти к прямым, хотя и трудоемким, но более надежным методам расчета для целого ряда вариантов проектируемого судна, отличающихся не только размерными и полнотой, но и расположением отсеков, размещением грузов и различными составными нагрузками. Более детальными особенностями формы корпуса. Подробнее этот вопрос освещен при рассмотрении перспектив развития методов оптимизации элементов судна (12.3).

Метод оптимизации элементов грузовых судов. Значительное число отечественных и зарубежных работ посвящено математическим методам оптимизации элементов судов и использованию ЭВМ для оптимизации параметрических методов. Систематизированное описание и обобщение этих работ сделано авторами сборников и книг [58, 68, 76, 78, 86, 91 и др.]. Рассмотрим одну из первых отечественных моделей, предназначенную для оптимизации элементов универсальных сузовогузовых судов, танкеров и судов для перевозки навалочных грузов. Эта модель обладает общими чертами, свойственными многим отечественным и зарубежным моделям.

В число оптимизируемых элементов X включены: коэффициент обвода полноты δ , отношение длины судна к ширине L_B , отношение ширины к осадке B_d , а также коэффициент полноты площади КВЛ α , частота вращения n и диаметр гребного вала d_p . Последние три переменные оптимизируются внутри расчетных процедур на каждом этапе оптимизации первых трех.

Задача может решаться применительно к следующим сочетаниям характеристик проектируемого судна, указанных в задании на проектирование:

- грузоподъемность и скорость, частота вращения гребного вала не задана;
- грузоподъемность, скорость и частота вращения вала;
- грузоподъемность и мощность главного двигателя (двигателей), частота вращения вала не задана;
- грузоподъемность, мощность и частота вращения вала.

При каждом сочетании исходных характеристик область допустимых значений элементов судна определяется следующей системой равенств и неравенств, выражающих требования:

к клинкости судна

$$D(x) - \sum_j P_j(x) = P_0; \quad (12.10)$$

к грузоместности

$$W_f(x) > \mu \cdot P_0; \quad (12.11)$$

к минимальному значению надводного борта в соответствии с Правилами о грузовой марке

$$H - T > F_{\text{нвб}}(x); \quad (12.12)$$

к нижнему пределу начальной метacentрической высоты

$$\frac{\Delta_{\text{нвб}}}{\delta}(x) > \left(\frac{\Delta}{\delta}\right)_{\text{нвб}}; \quad (12.13)$$

к верхнему пределу начальной метacentрической высоты

$$-\frac{\Delta_{\text{нвб}}}{\delta}(x) > -\left(\frac{\Delta}{\delta}\right)_{\text{нвб}}; \quad (12.14)$$

к расчетной скорости (мощность не задана)

$$v(x) = v_0^2; \quad (12.15)$$

к мощности ЭВ (скорость не задана)

$$N(x) = N^0; \quad (12.16)$$

к максимальной осадке

$$-T > -T_{\text{нвб}}; \quad (12.17)$$

Помимо этих требований для оптимизируемых элементов указан допустимый диапазон значений, обусловленный использованием в расчетах результатов серийных испытаний моделей и обработкой данных по их теоретическим чертежам:

$$\left. \begin{aligned} \delta_{\text{нвб}} > \delta > \delta_{\text{нвб}}; \\ l_{\text{нвб}} > l_B > l_{\text{нвб}}; \\ \delta_{T_{\text{нвб}}} > \delta_T > \delta_{T_{\text{нвб}}}; \\ \alpha_{\text{нвб}}(\delta) > \alpha > \alpha_{\text{нвб}}(\delta). \end{aligned} \right\} \quad (12.18)$$

Рекомендуемый критерий эффективности — удельные приведенные затраты.

При фиксированном сочетании δ , l_B и δ_T решается система алгебраических уравнений $g_s(x) = 0$, $l = 1, 2, 3, 4$; $s = 1, 2, 3, 4$; с наименьшими $x_s = L$ — длина судна, $x_2 = H$ — высота борта; $x_3 = v_0$ — скорость; $x_4 = \alpha$ — коэффициент полноты площади носовой части КВЛ.

В состав системы входят уравнения: масс ($s = 1$), вместимости и грузовой марки ($s = 2$), мощности ($s = 3$), остойчивости ($s = 4$)

в виде $[A/B](x) = (b/B)^s$, где $[A/B]^s$ — величина из заданного диапазона допустимых значений.

При решении системы автоматически предусматривается: замена уравнения вместимости уравнением грузовой марки, если определенная из условия требуемой грузоместности H не удовлетворяет Правилам о грузовой марке; исключение уравнения мощности при заданной скорости.

Система уравнений решается методом последовательных приближений Ньютона при заданных начальных значениях переменных x_i^0 . Критерием окончания процесса является заданная точность $\epsilon_i (x_i^{k+1} - x_i^k) \leq \epsilon_i$ либо заданное число приближений.

После определения элементов рассчитываются эксплуатационные экономические показатели и критерий эффективности.

Оптимизация осуществляется предложенным М. Н. Рейфманом методом, который условно назван координатно-матрично-шаговым:

1. Организуется три циклических вычислительных процесса по переменным δ_T , l_B и δ .

2. В результате вычислений для каждой комбинации δ_T , l_B и δ определяются значения осадки T , коэффициента полноты α , критерий эффективности $f(x)$ и других элементов и характеристик. В дальнейшем они фиксируются как столбец элементов.

3. При $l_B = \text{const}$, $\delta = \text{const}$ и переменном δ_T производится проверка выполнения неравенств $T < T_{\text{нвб}}$, $\alpha_{\text{нвб}} < \alpha < \alpha_{\text{нвб}}$. Если очередной столбец не удовлетворяет им, то предыдущий столбец отбрасывается. Если очередной удовлетворяет, а предыдущий нет, то предыдущий заменяется столбцом, полученным линейной интерполяцией между двумя рассматриваемыми столбцами.

4. Из оставшихся столбцов выбирается тот, у которого минимальное значение критерия эффективности $f(x)$. Если этот столбец содержит $\delta_{T_{\text{нвб}}}$ или $\delta_{\alpha_{\text{нвб}}}$, то он фиксируется, остальные отбрасываются. В противном случае по значению $f(x)$ и двум значениям $f(x)$ из соседних столбцов строится парабола второй степени и определяется $\min f(x) = f_{\text{нвб}}^0$. С помощью этого значения производится квадратичная интерполяция для всех элементов, входящих в столбец. В результате при $l_B = \text{const}$, $\delta = \text{const}$ имеют столбец элементов

$$(\delta, l_B, v^0, T^0, \alpha^0, \dots, f_{\text{нвб}}^0)^T.$$

5. При $\delta = \text{const}$ и переменном l_B во всех столбцах согласно п. 4 выбирается тот, у которого значение $f_{\text{нвб}}^0$ наименьшее. Если он содержит $l_{B_{\text{нвб}}}$ или $l_{\alpha_{\text{нвб}}}$, то он фиксируется, остальные отбрасываются. В противном случае по трем значениям $f_{\text{нвб}}^0$ строится парабола второй степени и определяется $\min f(x) = f_{\text{нвб}}^0$. В результате квадратичной l_B интерполяцией по всем элементам обра-

зудея стоек

$$(\delta, \beta, \delta_2^2, T^4, \alpha^3, \dots, f_{\text{max}})^T.$$

6. Из всех столбцов, полученных согласно п. 5, выбирается тот, который содержит наименьшее значение R_{max} и т. д. В результате получаются оптимальные элементы судна.

12.3. Перспективы развития методов оптимизации элементов судна

Рассмотрим ряд основных особенностей задач оптимизации в математической формулировке, которые, как показывает практический опыт, в значительной мере определяют надежность, работоспособность и доступность для широкого круга проектировщиков основного оборудования, а также изменчивости «внешних факторов», оценку окрестности оптимума — последствий отступления от формально оптимального решения, универсальность и способность адаптации модели к специфическим особенностям того или иного проектируемого судна.

Правильный учет этих особенностей определяет в значительной мере перспективы развития методов оптимизации элементов судов.

О достоверности расчетных методов уже говорилось при рассмотрении модели оптимизации в формуле И. Г. Бубнова, который закончил свой, теперь широко известный доклад так [31, с. 256]: «Если, что можно предумать метода, который давал бы возможность получить верные результаты, основываясь на неверных данных. Нет нужды убеждать, что невозможно оценить все основные качества судна и его эффективность зависящими только в функции от δ, L, B, T, H . Именно поэтому при определении элементов необходимо широкое, хотя и осторожное, использование прототипов и данных статистики, на что неоднократно обращалось внимание в предыдущих главах. Каким же еще из элементов необходимо для повышения достоверности расчетов при оптимизации элементов? И в каком виде они должны присутствовать в задаче — в виде самостоятельных оптимизируемых элементов либо определяемых по приближенным формулам, через δ, L, B, T, H ?

Практика дает один ответ — в число элементов судна при оптимизации, кроме традиционных величин δ, L, B, T, H , должны входить параметры, характеризующие архитектурно-конструктивный тип судна и размещение грузов в различных состояниях нагрузки, а также основных элементов всех его подсистем (корпуса, гидродинамического контура, энергетической установки, устройств и др.). Это позволяет использовать в моделях непосредственно прямые методы расчета.

Необходимость учета основных элементов подсистем очевидна. Действительно, нельзя надежно рассчитать массу, координаты ЦТ

и стоимость металлического корпуса, не зная материалов, используемых для изготовления его основных частей, системы набора и, по крайней мере, шпанги в средней части. Независимо достоверно оценить заданность судна без использования результатов истинной модели корпуса и гребных винтов, а это, в свою очередь, требует задания определенных параметров формы корпуса, элементов винта и т. п. Как уже упоминалось, без формы корпуса не рассчитать уверенно возмещение меташвиста и абсциссу ЦВ.

Особую роль при оптимизации элементов судна играет положение его ЦТ, влияющее на многие качества. Нужно с осторожностью относиться к расчету аппроксиматы ЦТ в долях только высоты борта. В самом деле, будет ли обоснованным решение об увеличении ширины судна или коэффициента полноты площади КВЛ при недостаточности начальной устойчивости, вызванной ли ее уменьшением устойчивости? Конечно нет, ибо при этом остаются без внимания более выгодные для эффективности судна способы увеличения устойчивости — понижая ЦТ с помощью некоторой переконфигурации отсеков, перераспределения переменного груза, топлива и т. п. А это оказывается возможным, если одновременно с размерными определяются, по крайней мере, приближенная компоновка судна и распределение всех переменных грузов по отсекам в основных состояниях нагрузки. То же самое можно сказать и об абсциссе ЦТ, существенно влияющей на дифферентку*. Подобные приемы можно продолжать.

Таким образом, нельзя оптимизировать элементы δ, L, B, T, H , не зная общей компоновки судна, размещения грузов на нем, основных элементов подсистем судна.

Более сложный вопрос о месте этих дополнительных переменных задач. Представляется, что было бы целесообразно следовать традиционному пути: использовать δ, L, B, H, T для получения дополнительной информации (с помощью сентя же приближенных зависимостей), по которой можно выполнять детальные, более надежные расчеты. Подобный переход «приближенности» с одного уровня на другой увеличит объем вычислений. Логичное исключение всех указанных элементов непосредственно в число оптимизируемых. При этом следует помнить, нужно ли все элементы оптимизировать одновременно или рациональнее организовать двухуровневую оптимизацию [88].

Об учете комплекта основной обводки при оптимизации элементов приходится говорить потому, что чаще всего для расчетов нагрузки и стоимости постройки судна используются формулы с непрерывной зависимостью массы оборудования, устройств, $3M$ и тому подобных от элементов. Это не соответствует истинному характеру именно указанных

* В методе последовательных приближений такая оценка исключается за счет графической обработки вариантов судна на отсечении элементарных. В оптимизационной автоматизированной процедуре такой возможности нет. Следовательно, сам алгоритм расчета должен быть более детальным.

масс. Для большинства подобных составленных нагрузки характера независимость или, в крайнем случае, ступенчатая зависимость от элементов. В первую очередь это касается главного двигателя со всеми обуславливающими его механизмами и системами. Их масса должна проработаться постоянной за редким исключением, когда одновременно с судном проектируется главный двигатель. Постоянными должны быть определенные составляющие разделов «Устройства судовые», а также «ЭЭС, внутрисудовые связи и управление» и даже «Корпус». Как известно, оборудование и механизмы указанных разделов подбираются, во-первых, из ряда довольно ограниченной номенклатуры. Во-вторых, сам выбор проводится с учетом требований Регистра СССР в зависимости от элементов того или иного удачного интегрального параметра, мало зависящего от изменения элементов судна при фиксированных характеристиках задания на его проектирование.

Об этом также повествует, потому что масса оборудования и механизмов составляет заметную долю в нагрузке. Следовательно, вводя фиктивные зависимости, мы вносим существенные искажения не только в абсолютные значения масс, координат ЦТ и статистич. но и в характер их изменения от исходных элементов.

Таким образом, оптимизация элементов должна предшествовать предварительное определение перечня подобных «постоянных» механизмов и оборудования и расчет их масс и статистич. (во первую очередь на базе предварительной компоновки).

Влияние изменчивости «внешних» факторов при определении элементов судов до сих пор не учитывалось, хотя во многих исследованиях подчеркивалась необходимость этого. Действительно, от итосковности грузовых работ, тарифных ставок, массогорючего характеристики груза и т. п. зависит эффективность, характерны для элементов судов. Доказывать существенную колеблемость исходных данных эксплуатационного характера нет необходимости. Обыкновенным способом ее учета является переход к вероятностной оценке эффективности судов. В методическом отношении задача оптимизации элементов не изменится, потребуются лишь введение новой процедуры расчета критерия эффективности. Этот вопрос подробно рассмотрен в работе [69].

Оценка окрестности оптимума — последний этап оптимизации от формально оптимального решения — необходима по двум причинам. Во-первых, реальная практика проектирования судов гораздо многообразнее любых моделей. Поэтому решающая роль проектианта в принятии решений, бесспорно, сохранится. Следовательно, он должен иметь информацию о последствиях не только различных «априори» возможных отступлений от оптимума, но и аппарат оперативной оценки любых других возможных изменений элементов по сравнению с оптимальными его моделями. Во-вторых, передача проектинту одновременно с оптимальным решением данных об окрестности оптимума позволяет преодолеть тот психологический барьер, который существует ныне между оптимизационными методами проектирования, дающим «точечное решение»,

и двудольными, дающим ответ на вопрос (режим «вопрос—ответ»).

Решение задачи об окрестности оптимума можно получить как следствие исследования устойчивости «точек» ограничений в основе расположения исходной задачи оптимизации элементов в линейную. Для этого необходимо задать допустимым отклонением от значения критерия эффективности в оптимизационной точке и сопоставляемыми в отступлении от границ по различным ограничениям. Необходимый аппарат изложен в работе [67]. В обзоре [76] приводятся методический прием, также использующий идею диверсификации исходной задачи в окрестности оптимума.

Универсальность и способность адаптации модели к специфическим особенностям того или иного проектируемого судна являются важнейшими условиями ее работоспособности и доступности широкому кругу проектиантов. В значительной мере универсальность достигается при увеличении числа оптимизируемых элементов и переходе к прямым методам расчета, что приводит к уменьшению количества используемых статистических зависимостей, укрупнению размерных по типам и даже типоразмерам судов. Тем не менее, при проектировании почти каждого судна приходится вносить в модель дополнения и уточнения, касающиеся особенностей архитектурно-конструктивного типа судна, тех или иных ограничений, расчетных зависимостей и т. п. Выходом из подобных ситуаций является управление тем или иным исходным данным и специальными коэффициентами. Однако в этом случае необходимо иметь все расчетные зависимости модели до тончайших деталей. Именно это обстоятельство сужает их доступность.

В последние годы намечался путь создания моделей, способных к адаптации, которая достигается за счет использования специальных программных средств, позволяющих проектинту на языке, близком к естественному, формулировать условия задания: перечень исходных данных оптимизируемых элементов, сравнения и критерий эффективности. Эта информация обрабатывается специальной системой программ, которая автоматически формирует вычислительный процесс из программных модулей, описывающих те или иные расчетные процедуры. Подобные специальные программные средства уже стали неотъемлемой частью сложных систем программ для решения различных судостроительских задач. В их числе можно назвать систему управления базой данных с командным языком для системы автоматизированного проектирования судов, программу генерирования алгоритмов, зарубежные системы-компиляторы и т. д. [68].

Таким образом, обоснованная оптимизация элементов судна возможна только при достаточно глубокой проработке каждого его варианта, а сделать это с учетом требований универсальности модели в рамках рассмотренной задачи невозможно. Встает вопрос

* Имеются в виду производные критерия по ограничениям в точке оптимума.

о создании системы взаимодействующих задач для оптимизации элементов судна в широком смысле. Принципиальная схема взаимодействия задач, отвечающая рассмотренным выше требованиям, показана на рис. 12.1. Систему оптимизации целесообразно организовать как двухэтапную.

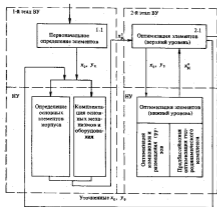


Рис. 12.1. Система взаимодействия задач при оптимизации элементов судна.

Верхний уровень первого этапа (задача 1.1) — предварительное определение элементов судна, необходимое для принятия решений о компоновке основных механизмов и оборудовании, а также о конструкции корпуса, а возможно и других специфических подсистем в зависимости от назначения судна. Для решения задачи 1.1 пригодны расчетные зависимости, рассмотренные в гл. 1—10, а также относительно простые оптимизационные модели (см. 12.2). В ходе решения этой задачи будут получены оптимальные в первом приближении размеры судна X^1 , в первую очередь размерные и интегральные параметры формы корпуса, и ориентировочные значения основных ограничений Y^0 . Величинами X^1 , Y^0 посту-

жат исходными данными для приближенного решения задач нижнего уровня (задача 1.2): определения основных элементов корпуса; компоновки основных механизмов и оборудования.

Для этой цели можно использовать специальные модели оптимизации конструкции корпуса, ВУ и др. [58].

Следовательно, первый этап подготовит обоснованные исходные данные для уточненной оптимизации на втором этапе — значения массы и стоимости тех составляющих нагрузок, которые в последующем физически независимы от элементов, а также массу и координаты ЦТ корпуса судна данного архитектурно-конструктивного типа, которые в дальнейшем будут изменяться только в связи с изменением размеров и в некоторых случаях с расположением отсеков и другие данные.

Второй этап оптимизации (задача 2.1) целесообразно организовать в виде двухуровневой схемы с обоснованным исходной координацией уровней в соответствии с принципом согласования оптимизации [67]. Задачу 2.1 в этом случае также можно решать с помощью указанных выше моделей, но с использованием, по возможности, прямых расчетных методов.

Задача 2.2, являющаяся составной частью оптимизации элементов в широком смысле, требует разработки и использования специальных моделей [68]. Необходимость возвращения к задаче 1.2 первого этапа будет определяться степенью расхождения значений элементов и оценок на том и другом этапах.

Рассмотренная совокупность задач предусматривает по существу определение всех основных элементов судна, которые формируют его как единую сложную систему. Таким образом, возможен переход от оптимизации элементов к системной оптимизации всего судна. Программная реализация рассмотренной совокупности задач означает не что иное, как автоматизацию системного проектирования судна*.

12.4. Оптимизация состава флота (первый этап)

Задача оптимизации пополнения флота и характеристик судов, осуществляемых в задании на проектирование, включает прогнозирование развития судов различных типов и установление потребности в них. Первую часть задачи решают на основе тенденции развития техники судостроения и смежных отраслей, а также предложений по совершенствованию судов традиционных типов или созданию новых. При этом выполняются проектные проработки с целью определения реализуемости таких предложений (см. 11.1, 11.2).

Рассмотрим на примере судов транспортного флота вторую часть задачи, т. е. определение потребности в судах различных типов.

* В отличие от системного можно выделить конструкторское проектирование, главной задачей которого является детализация проектных решений до системы, позволяющей осуществлять застройку судна, т. е. до выпуска конструкторской и конструкторско-технологической документации.

Формулировка задачи. Считаем, что тип судна определяется такими характеристиками, как декейт (грузоподъемность), грузоемкость, тип и мощность ЭУ (или скорость судна), архитектура-конструктивными особенностями и другими требованиями задания на проектирование.

Теоретически каждой конкретной линии перевозок соответствует свой оптимальный в экономическом отношении тип судна. На практике число типов строящихся и заказываемых судов ограничивается с целью использования благоприятного экономического эффекта увеличения числа судов в серии. Однако при этом отдельные суда могут оказываться неоптимальными при эксплуатации на некоторых линиях. Именно этим обстоятельством в первую очередь диктуется необходимость одновременной оптимизации числа судов и их характеристик, т. е. оптимизация состава флота для выполнения всех запланированных перевозок. Рассматривать весь флот в этой задаче необходимо также в потому, что в составе действующего флота уже имеются суда, эксплуатация которых может оказаться более эффективной на тех линиях, для которых планируются новые суда. В таких случаях новые суда следует проектировать для других линий, от противности и условий работы на которых зависят оптимальные характеристики судов. Расчеты показывают, что эти обстоятельства могут быть существенными при выборе оптимального решения.

В общем виде рассматриваемая задача может быть сформулирована так: необходимо составить оптимальный в экономическом отношении состав флота, обеспечивающий планируемые грузоперевозки при выполнении условий, определяющих постройку и эксплуатацию судов (при выполнении ограничений в части использования ранее построенных судов, с учетом возможностей заводоуправления, ограниченности глубин фарватеров и анкеровки портов, размеров партии перевозимого груза и т. п.).

Выявить оптимальный состав флота путем последовательного просмотра всех возможных комбинаций «судно—линия» при достаточно большом количестве линий не под силу даже современной вычислительной технике. Единственный выход — применение специальных математических методов оптимизации. Для этого необходимо сконструировать математическую модель, которая описывала бы все основные особенности поставленной задачи.

Двухэтапная оптимизация. Объективное решение задачи оптимизации характеристик перспективных судов можно получить только при одновременной оптимизации характеристик и необходимого числа судов на основе оценки эффективности флота в целом, выполняющего заданную работу. Решение на уровне флота позволяет учесть условия эксплуатации и взаимодействия судов, реальные возможности размещения заказов на постройку, лимиты ресурсов и средств и, таким образом, обеспечить оптимальную с народнохозяйственных позиций унификацию типов судов.

Одновременная оптимизация характеристик и количества заказываемых судов возможна в двух постановках:

— собственно математическая модель обеспечивает выбор только потребного числа судов различных типов на заданную множественность типов судов-претендентов; это множество составляется в начальной стадии решения задачи таким образом, чтобы в нем был представлен весь диапазон возможных значений оптимизируемых характеристик судов; такую постановку или модель будем называть *вариантной*;

— в число оптимизируемых параметров математической модели включаются характеристики и количество заказываемых судов без предварительного формирования множества типов судов-претендентов; такую модель назовем *непрерывной*.

На сегодня разработаны в основном математические модели *вариантного* типа. Пространства реализации и опыт их практического применения свидетельствуют о большом потенциальном эффекте, который получается при оптимальной унификации типов судов. Другим их достоинством является автоматическое условие балансированности заданной работы (например, объем перевозок) и имеющихся ресурсов. Недостаток *вариантных* моделей состоит в том, что выбор оптимальных характеристик возможен лишь на предварительно заданных значениях. Например, суда-претенденты имеют декейт 25, 50, 75 . . . тыс. т и, таким образом, и число оптимальных могут войти только указанные значения декейта. Попытки увеличить число судов-претендентов ведут к резкому росту размерности задачи, что при нескольких оптимизируемых характеристиках и большом числе запрещенных перевозок затрудняет решение задачи либо вообще делает ее неразрешимой. Из-за большой размерности *вариантной* модели практически невозможен достаточно детальный учет взаимодействия судов и специфических особенностей их использования.

Непрерывные модели более гибки в этом отношении: оптимальные значения характеристик определяются непосредственно. Однако использование таких моделей на уровне флота, как будет показано далее, чрезвычайно затруднено из-за сложности вычислений. Локализация же задачи рассмотрением отдельных типов судов или комплексов исключает возможность объективной оптимизации (унификации типов).

Чтобы использовать достоинства моделей обоих типов, целесообразно осуществлять двухэтапную последовательность решения задачи оптимизации характеристик судов и пополнения флота. На первом этапе использовать *вариантную* модель, позволяющую определить принципиальные направления пополнения флота (типы судов пополнения) и сбалансировать заданные объемы перевозок и имеющиеся ресурсы. Поскольку такая модель должна учитывать ранее построенные суда, в результате решения можно установить нагрузку — объемы грузоперевозок, приходящиеся на суда пополнения, т. е. суда, которые должны быть построены в планируемом периоде. На втором этапе для этих объемов и уже существенно меньшего числа направлений перевозок решается задача уточнения характеристик новых судов с учетом более детальных условий

эксплуатационного и производственного характера. Для этой же цели целесообразно использовать непрерывные модели, позволяющие оптимизировать непосредственно характеристикам судов.

Математическая модель задачи первого этапа. Необходимо установить оптимальные в экономическом отношении типы заказываемых судов и их количество при выполнении следующих условий-ограничений:

запланированные объемы грузоперевозок выполняются;
ресурсы и средства на пополнение флота не превышают допустимых размеров;

в выполнении грузоперевозок могут участвовать ранее построенные суда, если это окажется экономически целесообразным;
обеспечивается получение максимального дохода по флоту в целом не ниже контрольного уровня;

указываемая в контрактах на поставку грузов частота грузопоставок соблюдается;
заказ судов различных типов согласуется с возможностями судостроительных предприятий.

Очевидно, что при решении задачи выполнение планируемых грузоперевозок может оказаться невозможным, например, из-за ограниченности средств на пополнение флота. Следовательно, решение задачи должно осуществляться в несколько приближений, с соответствующей корректировкой объемов планируемых работ, перевозок и лимитов средств или ресурсов.

Обозначим индексом i тип судна, причем $i \in I$, где I — множество всех типов судов-предпочтений, из числа которых выбираются оптимальные. В связи с тем, что стоимость постройки и эксплуатации существующих, строящихся и проектируемых судов по-разному учитывается в критерии экономической эффективности, будем различать следующие подмножества типов: P — типы построенных судов; R — типы судов, постройка которых уже освоена и может продолжаться; S — типы судов, которые могут быть спроектированы и построены. Соответственно $|P \cup R \cup S| = |I|$.

Примем P^1 — подмножество типов судов, заказываемых отечественной промышленностью; P^2 — импортность типов судов, которые могут быть получены по импорту; $|P^1| = |P^2| = |P^1 \cup P^2|$.

Все линии (маршруты) перевозок сгруппируем в подмножества: J_p — каботажные линии; J_i — экспортно-импортные линии; J_m — линии перевозок грузов иностранными фрахтователями (ГИФ).

Каботажные линии — это линии между отечественными портами. **Экспортно-импортные линии** — это линии, на которых осуществляются перевозки экспортных грузов, проданных (или купленных) с условием доставки их отечественными судами. К линиям перевозок ГИФ относим те, на которых отечественные суда фрахтуются иностранными. Тогда J — все множество линий и $|J| = |J_p \cup J_i \cup J_m|$. Примем также q — индекс бассейна (пародства), $q \in Q$, где Q — множество бассейнов; t — сезон (пе-

риод года), в течение которого наблюдается сравнительно устойчивый грузопоток, $t \in T$, где T — множество сезонов. Будем считать, что различия времени года на seasons одинаковы для всех $j \in J$ (j — индекс линии). Соответственно J^t — множество всех линий в t сезон, связанных с q -м бассейном.

Введем следующие обозначения: x_{ij}^t — число судов i -го типа, используемых на j -й линии в t сезон; u_{ij}^t — число передислоцированных судов i -го типа на числа тех, которые оказались в данной сезон в бытовомынии; x_{iq}^t — число заказываемых судов i -го типа для q -го бассейна; x_i — суммарное число заказываемых судов i -го типа; x_{iq} — количество вмещаемых в составе флота (в q -м бассейне) судов i -го типа из подмножества J^t ; d_{ij}^t — провозная способность судна i -го типа на j -й линии за весь t сезон, рассчитываемая с учетом возможных ограничений размеров партий перевозимого груза, неиспользования грузоподъемности из-за ограниченности глубин в портах и каналах, а также из-за недостаточной вместимости трюмов при перевозке отдельных видов груза; k_{ij}^t — провозная способность за t сезон передислоцированного судна, рассчитываемая аналогично d_{ij}^t с учетом времени на переход из одного бассейна в другой; A_{ij}^t — грузопоток судна на j -й линии в t сезон; d_{ij}^t, k_{ij}^t — число рейсов за сезон на j -й линии для судов, работающих в бассейне притяжки и передислоцированных в другой бассейн; m_{ij}^t, M_{ij}^t — минимально и максимально допустимая частота грузоперевозок на j -й линии; q_j^t, f_j^t — минимальный доход за сезон для судов, работающих в бассейне притяжки и передислоцированных в другой бассейн; B — контрольный уровень минимального дохода по флоту в целом; c_{ij}^t, d_{ij}^t — эксплуатационные расходы по одному судну за сезон на j -й линии, исключая расходы, пропорциональные стоимости судна; величина d_{ij}^t рассчитывается с учетом затрат на переход судна из одного бассейна в другой; K_i — стоимость постройки серийного судна i -го типа либо цена судна в случае его приобретения за рубежом, указанная в эквиваленте советской валюты; r_i — затраты на подготовку производства и освоение серийной постройки судов i -го типа (для варианта задания с фиксированными доплатами); $\varphi_i(x_i)$ — функция серийности, определяющая величину превышения средней стоимости судна серии над стоимостью серийного судна (для варианта задания с функцией серийности); K_s — средняя немортизуемая стоимость равно построенных судов, рассчитываемая по фактическому сроку службы судов до момента принятия решения об их дальнейшем использовании; z_i^t — эксплуатационные расходы судна, взвешиваемые на отсчете в t сезон; E_s — коррективный коэффициент эффективности капитальных вложений; x_i^* — максимально допустимое число судов i -го типа, которое может быть построено с учетом реальных возможностей судостроительного предприятия; K_1 — лимит капиталовложений на постройку судов подчинения отечественными заводами; K_2 — ли-

мит илаводных средств на приобретение судов за рубежом; e_1 — коэффициент учета расходов, пропорциональных стоимости судна.

Оптимизация характеристик судов и пополнение флота связаны с необходимостью рассмотрения различных вариантов решения народнохозяйственной задачи — осуществления перевозок грузов. В соответствии с «Гидрометодикой» определения экономической эффективности капитальных вложений выбор наилучшего варианта должен осуществляться по минимуму приведенных затрат, представляющих собой сумму текущих (эксплуатационных) затрат и капитальных вложений, приведенных к одинаковой размерности в соответствии с нормативом эффективности E_n . Поэтому в задачах оптимизации характеристик судов и пополнения флота целесообразно использовать в качестве критерия экономической эффективности величины суммарных приведенных затрат по флоту. Специфика этих задач требует дополнительного рассмотрения некоторых вопросов, связанных с построением функции критерия.

1. При решении задачи с учетом ранее построенных судов возможны ситуации, когда в оптимальный план не войдут некоторые из этих судов, несмотря на то, что их фактический срок службы меньше расчетного. В этих случаях в критерий в качестве капитальных вложений по новому флоту должна добавляться немоторизованная (остаточная) стоимость старых судов, которые не получили место ни на одной из линий перевозок и должны быть списаны. Введение остаточной стоимости списываемых судов позволяет количественно учесть фактор морального старения ранее построенных судов. В случае, если старые суда остаются в составе флота, приведенные затраты по ним состоят только из эксплуатационных расходов.

2. Затраты на подготовку производства и освоение серийной постройки судов можно учитывать двумя способами: стоимость всех судов одной серии принимается одинаковой, а затраты на подготовку и освоение постройки учитываются фиксированной величиной r_i , т. е. суммарные капиталовложения на постройку судов серии равны $\sum (k_{ij}x_i + r_i)$, где $i = 1, \dots, n$, $x_i > 0$ и $x_i = 0$ при $k_i = 0$ (вариант задачи с фиксированными доплатами);

стоимость каждого судна серии зависит от порядкового номера судна в серии (рис. 12.2).

Во втором случае суммарные капиталовложения по всем судам серии равны $\sum k_{ij}x_i$. При этом функции серийности должны рассчитываться следующим образом:

$$\psi_i(x_i) = \frac{\sum_{j=1}^{x_i} h_j(x_i)}{x_i} \quad (12.19)$$

где h_j — стоимость постройки серийного судна; $h_j(x_i)$ — функция,

учитывающая превышение стоимости данного судна серии над стоимостью серийного судна.

В математической модели предусматриваются оба рассмотренных способа учета затрат на подготовку производства и освоение серийности постройки судов.

Перейдем непосредственно к построению математической модели. Требуется определить оптимальные типы судов и пополнение флота $\{x_i\}$, распределение этого пополнения по бассейнам $\{x_{ij}\}$, а также распределение всего флота по линиям $\{x_{ij}^0\}$, $\{x_{ij}^1\}$, где $x_i = \sum_{j \in J} x_{ij} = \max_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij}^0$. Это решение, называемое далее оп-

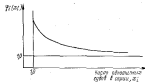


Рис. 12.2. Характер функции серийности.

тимальным планом, должно удовлетворять следующим условиям (ограничениям).

1. Условия выполнения планируемых грузоперевозок:

$$\sum_{i \in I} a_{ij}^0 x_i^0 + \sum_{i \in I} a_{ij}^1 x_i^1 > A_j^1, \\ \forall j \in J^0, j \in J^1, q \in Q.$$

В зависимости от выбранного способа решения задачи в случае несовместности условий при ограниченных средствах на постройку и приобретение судов данная группа условий формируется:

а) в виде неравенств по всем $j \in J$, если корректировка планируемых грузоперевозок выполняется экспертным путем; критерий задачи в этом случае может использоваться в любой из рассмотряемых форм;

б) в виде равенств по обязательным линиям и приближенным равенств по остальным линиям, если одновременно с оптимизацией пополнения производится автоматический корректировка объемов грузоперевозок; в этом случае задача решается с критерием в виде минимизации затрат к доходу.

2. Условие получения планируемого инвального дохода по флоту в целом:

$$\sum_{i \in I'} \sum_{j \in J' \cup J''} \sum_{q \in Q} k_j x_{ij} + \sum_{i \in I'} \sum_{j \in J' \cup J''} \sum_{q \in Q} h_j \rho_{ij} > B.$$

Как и в предыдущем случае, это условие записывается либо в виде неравенства, либо в виде приближенного равенства, в зависимости от способа преодоления несовместности условий.

3. Условие выполнения частоты грузоотправок:

$$\sum_{i \in I'} k_i x_{ij} + \sum_{i \in I'} k_i \rho_{ij} > m_j;$$

$$- \sum_{i \in I'} k_i x_{ij} - \sum_{i \in I'} k_i \rho_{ij} > -M_j, \quad \forall i \in I', j \in J, q \in Q.$$

4. Условия, учитывающие возможные ограничения пополнения флота судами отдельных типов вследствие ограниченности числа стальных мест определенных размеров, пропускной способности этих мест и др.:

$$\sum_{i \in I'} x_{ij} < n_i, \quad \forall i \in I' \cup I''.$$

5. Условия, учитывающие ограничения ресурсов и средств на постройку судов отечественными заводами и приобретение судов за рубежом:

$$\sum_{i \in I' \cup I''} k_i \sum_{j \in J} x_{ij} < K_1,$$

$$\sum_{i \in I'} k_i \sum_{j \in J} x_{ij} < K_2.$$

Первое из этих условий записано в форме, соответствующей варианту задачи с фиксированным доплатом (см. ниже критерий 10).

Если задача решается с учетом функции сербизности (см. ниже критерий 11), то условие принимает вид

$$\sum_{i \in I' \cup I''} k_i \varphi_i(x_i) \sum_{j \in J} x_{ij} < K_1.$$

Потому ограничений 1—5, отражающих основное содержание задачи, введем следующие формальные условия, дисциплинирующие математическое решение, т. е. ограничивающие область изменений неизвестных их реальными значениями.

6. Суммарное число всех передислоцированных в i -ю базу судов i -го типа не превышает числа свободных судов в этом сезоне по всем бассейнам:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J'} x_{ij} < \sum_{i \in I} (x_{i0} - \sum_{j \in J'} x_{ij}), \quad \forall i \in I, j \in J.$$

7. Ограничение использования ранее построенных судов их количеством:

$$\sum_{i \in I'} x_{ij} < x_{i0}, \quad \forall i \in I', q \in Q, j \in J.$$

8. Количество всех используемых в q -м бассейне судов не превышает числа заказываемых судов для этого бассейна:

$$\sum_{i \in I'} x_{ij} < x_{iq}$$

$$\forall i \in I' \cup I'', q \in Q, j \in J.$$

9. Условие неотрицательности всех новых неизвестных. Построим функцию критерия рассматриваемой задачи:

$$x_{ij}, \rho_{ij}, x_{iq} > 0,$$

$$\forall i \in I, j \in J, i \in I', q \in Q.$$

10. В варианте задачи с фиксированным доплатом

$$f(x_{ij}, \rho_{ij}, x_{iq}, z_i) = \sum_{i=1}^n f_i \rightarrow \min,$$

где f_i — составляющие функции критерия, рассчитываемые следующим образом:

$$f_1 = \sum_{i \in I'} \sum_{j \in J} \sum_{q \in Q} c_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in I'} \sum_{j \in J'} \sum_{q \in Q} d_{ij} \rho_{ij} -$$

— эксплуатационные расходы по всему флоту, исключая расходы, пропорциональные стоимости судна. Этой составляющей критерия учитываются также издержки, связанные с вытеснением средств, заключенных в перевозимом грузе, и издержки на грузовые работы в портах;

$$f_2 = \sum_{i \in I' \cup I''} (E_i + \epsilon_i) k_i \sum_{j \in J} x_{ij} -$$

— доля приведенных затрат, учитывающая стоимость постройки и приобретения судов, а также расходы, пропорциональные стоимости судна;

$$f_3 = E_i \sum_{j \in J'} x_{ij} -$$

— доля приведенных затрат, связанная с расходами на подготовку производства и основные серийной постройки судов i -го типа, где множитель

$$z_i = \begin{cases} 1 & \text{при } \sum_{j \in J} x_{ij} > 0 - \text{постройка судов} \\ i\text{-го типа предусматривается} \\ 0 & \text{при } \sum_{j \in J} x_{ij} = 0 - \text{постройка судов} \\ i\text{-го типа не предусматривается;} \end{cases}$$

$$f_2 = E_n \sum_{i \in I} k_i \sum_{s \in Q} (x_{is}^0 - x_{is}) -$$

— доля приведенных затрат, учитывающая амортизированную часть стоимости ранее построенных судов, не вошедших в оптимальный план;

$$f_3 = \sum_{i \in I} \sum_{s \in Q} a_i^1 u_i^1 -$$

— суммарные расходы по возможному оттоку судов и

$$a_i^1 = \sum_{s \in Q} (x_{is} - \sum_{j \in J, j \neq i} x_{ij}^1) - \sum_{s \in Q, j \in J, j \neq i} u_j^1 -$$

— количество судов i -го типа, находящихся в i -м сезоне на оттоке, $i \in I$. В варианте задачи с функцией серийности

$$f(x_{ij}, u_i^1, x_{is}) = \sum_{i \in I} f_i \rightarrow \min,$$

где составляющие f_i рассчитываются следующим образом: f_1 — эксплуатационные расходы по флоту; f_2 — доле приведенных затрат, учитывающая амортизированную стоимость ранее построенных судов, не вошедших в оптимальный план; f_3 — суммарные расходы по возможному оттоку судов;

$$f_1 = \sum_{i \in I^1} (E_{1i} + c_i) k_i \bar{q}_i \left(\bar{x}_{i0} + \sum_{s \in Q} x_{is} \right) \sum_{s \in Q} x_{is} -$$

— доля приведенных затрат, учитывающая стоимость постройки судов из подмножества I^1 и расходы, пропорциональные стоимости судна;

$\bar{q}_i \left(\bar{x}_{i0} + \sum_{s \in Q} x_{is} \right)$ — функция серийности, определенная с учетом того, что к началу планируемого периода уже построено \bar{x}_{i0} судов i -го типа;

$$f_2 = \sum_{i \in I^2} (E_{2i} + c_i) k_i \bar{q}_i \left(\sum_{s \in Q} x_{is} \right) \sum_{s \in Q} x_{is} -$$

— то же для судов из подмножества I^2 ;

$$f_3 = \sum_{i \in I^3} (E_{3i} + c_i) k_i \sum_{s \in Q} x_{is} -$$

— то же для судов из подмножества I^3 .

Анализ математической модели. Итак, рассмотренная в содержательном плане модель со всеми ее подвариантами с математической точки зрения сводится к моделям двух типов:

задача с линейным критерием, линейными и нелинейными ограничениями (рис. 12.3, а);

частично нелинейной задачей с линейным, но разрывным критерием и с линейными ограничениями (рис. 12.3, б).

Первая задача соответствует модели, в которой затраты на подготовку производства и освоение серийной постройки судов учитываются с помощью функции серийности. Вторая задача относится к модели с фиксированными доплатами.

С математической точки зрения модель указанных задач эквивалентна следующим:

1. Определить такие x_{ij} , x_i , чтобы

$$f(x_{ij}, x_i) = \sum_{i \in I} c_i x_{ij} + \sum_{i \in I} g_i(x_i) \rightarrow \min \quad (12.20)$$

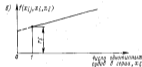
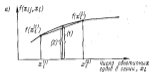


Рис. 12.3. Характер функции критерия: а — в первой задаче; б — во второй задаче.

при наличии ограничений

$$\sum_{i \in I} a_{ij} x_{ij} > a_{ij}, \quad \forall j \in J; \quad (12.21)$$

$$\sum_{i \in I} R_i(x_i) < K; \quad (12.22)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} < x_{ij}^1, \quad \forall i \in I; \quad (12.23)$$

$$x_i < x_{i \max}^1, \quad \forall i \in I; \quad (12.24)$$

$$x_{ij}, x_i > 0, \quad \forall i \in I, j \in J. \quad (12.25)$$

2. Определить также x_{ij} , x_i , z_i , чтобы

$$f(x_{ij}, x_i, z_i) = \sum_{i \in I} c_i x_{ij} + \sum_{i \in I} c_i x_i + \sum_{i \in I} r_i z_i \rightarrow \min \quad (12.26)$$

при наличии ограничений

$$\sum_{i \in J} a_{ij}x_{ij} \geq a_j, \quad \forall j \in J; \quad (12.27)$$

$$\sum_i \lambda_i x_i \leq k, \quad (12.28)$$

$$\sum_i x_i \leq x_i, \quad \forall i \in I; \quad (12.29)$$

$$x_i \leq x_{i \max}, \quad \forall i \in I; \quad (12.30)$$

$$x_{ij}, x_i \geq 0, \quad \forall i \in I; \quad (12.31)$$

$$x_i = \begin{cases} 0, & x_i = 0; \\ 1, & x_i > 0; \end{cases} \quad \forall i \in I. \quad (12.32)$$

Рассмотрим математические свойства моделей. Первая задача представляет собой нелинейную с вогнутой функцией критерия и невыпуклой областью допустимых решений. Нелинейность обусловлена наличием в критерии члена $\sum_i g_i(x_i)$, представляющего собой долю приведенных затрат, зависящую от стоимости постройки, или в ранее принятых обозначениях $\sum_i g_i(x_i) = \sum_i (E_{ij} + e_i) k_{ij} \varphi(x_i) x_i$, где $\varphi_i(x_i)$ — функция серийности, характер которой показан на рис. 12.2. В целом, с учетом этого характера, функция критерия $f(x_i, x_i)$ является вогнутой по отношению к x_i в том смысле, что в допустимой области изменения x_i для любых двух точек $x_i^{(1)}$ и $x_i^{(2)}$ и любого $\lambda \in (0, 1)$ имеет место соотношение

$$f(\lambda x_i^{(1)} + (1-\lambda)x_i^{(2)}) > \lambda f(x_i^{(1)}) + (1-\lambda)f(x_i^{(2)}), \quad (12.33)$$

т. е. ordinаты f функции критерия (см. рис. 12.3, а) в интервале $[x_i^{(1)}, x_i^{(2)}]$ больше ordinат 2 отрезка, проведенного через точки $f(x_i^{(1)})$ и $f(x_i^{(2)})$.

Условие $\sum_i \lambda_i(x_i) \leq k$, выражающее ограниченность средств на постройку судов, с учетом свойств функции серийности делает область допустимых решений невыпуклой ($\sum_i \lambda_i(x_i) = \sum_i k_{ij} \varphi(x_i) x_{ij}$). Множество допустимых решений $|x|$ понимается выпуклым в том смысле, что для любых двух точек x_1 и x_2 и любого $\lambda \in (0, 1)$ имеет место соотношение $\lambda(x_1) + (1-\lambda)x_2 \in |x|$, т. е. вместе с точками x_1, x_2 , принадлежащими $|x|$, этому множеству целиком принадлежит и отрезок, соединяющий эти точки. Таким образом, имеет место минимизация вогнутой функции на невыпуклом допустимом множестве. Эта задача является многоэкстремальной, т. е. существуют локальные оптимумы, достигаемые в крайних точках допустимой области (существование локальных точек показано на рис. 12.4).

Вторая задача является частично целочисленной или задачей с фиксированными доплатами, в качестве которых выступают числа e_i . Эти числа, представляющие затраты на подготовку про-

наводства и освоение серийной постройки судов, включаются в критерий только в случае, если суда данных типов входят в оптимальный план пополнения флота, т. е. при $x_i > 0$. Пример подобной разрывной функции критерия показан на рис. 12.3, б. По ранее сделанному определению эта функция является вогнутой. Область допустимых решений ограничена линейными условиями. Таким образом, имеет место минимизация вогнутой функции на выпуклом множестве, возможны локальные оптимумы, достигаемые в крайних точках допустимой области.

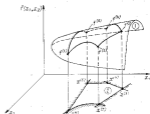


Рис. 12.4. Наличие локальных экстремумов при минимизации вогнутой функции.

1 — поверхность критерия; 2 — область допустимых решений, поверхность невыпуклая линейного вида; $x_1^{(1)}, x_1^{(2)}, \dots, x_1^{(n)}$ — различные абсциссы; $f(x_1^{(1)}), f(x_1^{(2)}), \dots, f(x_1^{(n)})$ — соответствующие локальные экстремумы.

Алгоритмы оптимизации. Не существует эффективных в вычислительном плане алгоритмов, приводящих к точному решению рассматриваемых задач. Представленные ниже алгоритмы построены с учетом специфики задачи и позволяют, как показали многочисленные расчеты, получать достаточно хорошие результаты.

Первая задача с ограничениями (12.21) — (12.25). Нелинейные функции $g_i(x_i), k_i(x_i)$ линейно аппроксимируются в начальной точке x_i^0 , за которую принимается ожидаемое решение задачи:

$$\left. \begin{aligned} \bar{g}_i(x_i) &= \alpha_i x_i + \beta_i; \\ \bar{k}_i(x_i) &= \alpha_i' x_i + \beta_i'. \end{aligned} \right\} \quad (12.34)$$

Тогда первая задача сводится к линейно-программной. Далее решение используется алгоритм двойственного симплекс-метода либо другой подходящей алгоритм. Решением линейной задачи

является набор чисел $x_1^{(j)}$, $x_2^{(j)}$, который представляет собой допустимое решение исходной нелинейной задачи. Дальнейшее улучшение допустимого решения осуществляется заменой функций $\varphi_1(x_i)$, $k_1(x_i)$ и линейным приближением относительно $x_i^{(j)}$:

$$\tilde{\varphi}_1(x_i) = \left[\varphi_1(x_i^{(j)} - x_i^{(j)}) \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_i}(x_i - x_i^{(j)}) \right] + x_i \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_i}(x_i - x_i^{(j)}), \quad (12-35)$$

аналогично для функций $k_1(x_i)$.

Критерий кодовой задачи $\sum_{i=1}^n c_i x_{i1} + \sum_{i=1}^n \tilde{\varphi}_1(x_i)$, в свою очередь, является линейной функцией, которая минимизируется при наличии линейных ограничений. Решение этой задачи — числа $x_1^{(j+1)}$, $x_2^{(j+1)}$. Процесс повторяется до совпадения решений на двух последовательных шагах. В этом случае достигнут условный локальный минимум. Меняя начальную точку x^j , получим последовательность локальных минимумов, наименьший из которых принимается за приближенное решение исходной задачи. Рассмотренный алгоритм является модификацией алгоритма В. Е. Солодатова [68, с. 71].

З а м е ч а н и я. Рассмотрен вопрос о трансформации задачи в продолжении непрерывности переменных x_{ij} . Числа x_{ij} позволяют избежать судов определенных типов за определенными порожками. Дробные значения x_{ij} свидетельствуют о том, что за данным порожком некоторые из судов вытаскиваются в течение части эксплуатационного периода. Следовательно, переменные x_{ij} по смыслу непрерывны. Переменные x_{ij} указывают суммарную потребность в судах данного типа, по смыслу целые, но алгоритм это не учитывает. Поэтому предлагается в оптимальном решении значения x_{ij} округлить до ближайших целых. При этом условии $\sum_{i=1}^n x_{i1} = x_1$ можно выразить либо путем переписки x_{ij} кратчайшим отклонением целого и непрерывного значений x_{ij} , либо округленной x_1 с учетом их влияния на критерий эффективности. С математической точки зрения это нестрого, ибо округление может привести к нарушению ограничений по грузоподъемности и суммарным характеристикам. Однако в практическом отношении этим можно пренебречь в силу относительно малого различия между целыми и округленными значениями x_{ij} (имеются в виду, что сами x_{ij} как правило, большие), а также приближенного характера задачи — задачах перевозок, грузоподъемности, объемах капиталовложений и т. п.

Вторая задача с ограничениями (12-27) — (12-31). Методы решения подобных задач с разрывной функцией критерия строятся, как правило, на эвристических приемах, использующих значения переменных границ параметров [89]. Ниже рассматривается простой для машинной реализации алгоритм, учитывающий специфику задачи и позволяющий, как показал опыт, достаточно быстро получать приближенное решение.

Вычислим максимально возможное число судов i -го типа по правилу

$$\theta_i = \min[\max(1, \theta_i^*), x_{i, \max}], \quad (12-36)$$

где $\theta_i^* = \sum_{j=1}^n (a_{ij}/a_{ij}^*)$ — число судов i -го типа, имеющих минималь-

ные удельные приведенные затраты на J^* -м подмножестве линий. В частном случае $|J^*| = 1$. Задаем исходную задачу новой с критерием $\sum_{i=1}^n c_i \theta_i + \sum_{i=1}^n [c_i + (r_i \theta_i)] x_i$, являющуюся линейной. Решение этой задачи с ограничениями (12-27) — (12-31) есть точка $x_1^{(j+1)}$, $x_2^{(j+1)}$, которая является допустимой точкой исходной задачи, ибо обе они имеют одинаковые ограничения. Для этой точки, следуя [89], можно указать приближенную оценку. Если $f^{(j)}$ — минимум критерия второй задачи в линейном варианте, а $f^{(j+1)}$ — значение исходного критерия этой задачи в точке $x_1^{(j+1)}$, $x_2^{(j+1)}$, то можно ожидать $f^{(j)} < f^{(j+1)} < f^{(j)}$, где $f^{(j)}$ — минимальное значение критерия.

Полученное на первом шаге решение $x_1^{(j+1)}$, $x_2^{(j+1)}$ и критерий $f^{(j+1)}$ можно улучшить. Так, на следующем шаге примем $\theta_i = x_1^{(j)}$ в повторном решении. Процесс продолжится до получения одинаковых x_{i1} , x_{i2} на двух любых шагах. Поскольку изменение критерия от шага к шагу немонотонно, за приближенное решение примем точку, которой соответствует минимум исходного критерия второй задачи. Как показали минимные эксперименты и опыт последующих расчетов, для этого необходимо сделать 10—15 шагов (затем ЭВМ останавливает). Вероятность получения при этом $\theta_i < 1$ очень мала. Указанные свойства алгоритма сохраняются, если на первом шаге по всем $i \in I$ в качестве θ_i принимается достаточно большое число, т. е. первоначально задача решается без фиксированных данных. Меняя начальные значения θ_i , можно получать набор решений, из которых выбирается наилучшее.

Величина эффекта оптимизации состава флота, как показывают вычисления с помощью рассмотренных методов расчета, может составлять не менее 5—10% экономии суммарных приведенных затрат на постройку новых судов. При этом значительная доля эффекта образуется за счет уменьшения числа типов и увеличения размеров серий заказываемых судов. Последнее является дополнительным подтверждением целесообразности решения задачи оптимизации флота в рассмотренной постановке и необходимости учета нелинейности, обусловленной наличием затрат за подготовку производства и освоение серийной постройки судов [68, с. 74—77].

12.5. Уточнение основных характеристик судов, указываемых в задании на проектирование (второй этап задачи оптимизации состава флота)

Исходя из принятой двухэтапной оптимизации на первом этапе необходимо решить задачу уточнения (оптимизации) характеристик судов подполучая с учетом приходящих на их долю нагрузки и более детальных условий эксплуатационного и производственного характера, влияющих на эффективность флота. Для

этой цели целесообразно использовать непрерывные модели, позволяющие оптимизировать характеристики судов, непосредственно вводя их в число оптимизируемых параметров.

Формулировка задачи. Из решения задачи первого этапа известны направления и объемы перевозок, для реализации которых должны быть спроектированы и построены новые суда. Число таких направлений (линий) будет существенно меньше общего числа линий в задаче первого этапа, поскольку приrost грузооборота в планируемом периоде сравнительно невелик по отношению к общему грузообороту. Пусть J множество указанных направлений и j — индекс направления. Для наглядности разбием на подмножества линий пустым.

Вектор характеристик, определяющий тип (габарит) судна, обозначим z . Составляющие этого вектора — дейдвейт и (или) грузоподъемность, скорость, грузоемкость, характеристика грузовых средств и т. д. Считаем, что существуют функции, позволяющие рассчитывать эксплуатационные расходы, приведенную способность и стоимость судов при различных значениях z — функций $c_j(z)$, $a_j(z)$ и $k_j(z)$. Тогда для уточнения или оптимизации характеристик судов следовало бы в традиционной постановке решить задачу типа

$$\min_{z \in S} \sum_{j \in J} \frac{1}{a_j(z)} [c_j(z) + (E_N + d)k_j(z)] \quad \forall j \in J, \quad (12.37)$$

где z — множество допустимых значений характеристик судна, определяемое ограничением размеров судна, наличием конкретных главных двигателей и другое; в качестве критерия приняты приведенные затраты на единицу перевозимого груза.

Для решения задач такого типа разработан ряд методов. Однако, как уже отмечалось, в такой постановке невозможно учесть влияние размеров серий судов на экономическую эффективность флота, наличие общего ограничения средства на пополнение флота и т. д. Поэтому предполагается осуществлять оптимизацию характеристик одновременно по всей совокупности судов пополнения. Для этой цели вводим в число оптимизируемых параметров также количество судов $x_j = x_j(z)$, необходимое для обеспечения перевозок на j -й линии, причем характеристика этих судов $z = z_j$, где $z \in S$ и S — множество наборов характеристик судов в оптимальном плане пополнения (множества типов судов, каждый из которых определяется вектором z). В традиционной постановке $|S| = |J|$, поскольку без учета серийности для каждой линии наилучшим является свой набор характеристик (тип судна). В предлагаемой комплексной постановке $|S| < |J|$, т. е. оказывается эффективной унификация типов судов.

Исходя из изложенного, задача формулируется следующим образом: определить рациональное число типов судов пополнения, их характеристики и потребное количество судов каждого типа, обеспечивающее минимум приведенных затрат по всем судам пополнения при выполнении: а) грузооборота на линиях, для кото-

рых необходимы новые суда; б) контрольного уровня инвального дохода; в) ограничений средств на пополнение флота; г) ограничений на характеристики судов; д) ограничений на максимально допустимое число судов с различными характеристиками.

Перейдем к построению математической модели, для этого примем следующие обозначения: x_j — количество судов с характеристиками z_j для j -й линии; $c_j(z_j)$ — годовые эксплуатационные расходы одного судна с характеристиками z_j на j -й линии, исключая расходы, зависящие от стоимости судна; $k_j(z_j)$ — стоимость одного серийного судна с характеристиками z_j ; $\Psi(\sum_{j \in J} x_j z_j)$ — функция серийности; $r_j = r(z_j)$ — затраты на подготовку производства и освоение серийности постройки судов — для варианта задачи с фиксированными доплатами; $a_j(z_j)$ — годовая провозная способность судна с характеристиками z_j на j -й линии, рассчитываемая с учетом реальных особенностей данной линии и ограничений груза; A_j — годовой грузооборот на j -й линии; $l_j(z_j)$ — судовый инвальный доход одного судна; B — контрольный уровень инвального дохода по флоту; K — лимит капиталовложения на пополнение флота; $[z_{\min}, z_{\max}]$ — общий диапазон допустимых характеристик судов;

$\left\{ \begin{matrix} z_{\min} \\ z_{\max} \end{matrix} \right\}$ — диапазон допустимых характеристик судов, т. е.

таких характеристик, при которых допустимое число судов ограничено сверху;

$\lambda \in K$, K — множество таких диапазонов (ограничений); $d^* =$ ограничение допустимого числа судов с характеристиками z_j , принадлежащими λ -му диапазону; E_N — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений; d — коэффициент учета эксплуатационных расходов, зависящих от стоимости судна.

Математическая модель. Нужно определить такие $|S|$, z_j , x_j , при которых

$$\sum_{j \in J} \sum_{z \in S} c_j(z) x_j + \left\{ (E_N + d) \left[\sum_{z \in S} k(z) \Psi \left(\sum_{j \in J} x_j z_j \right) \sum_{j \in J} x_j \right] \right. \quad (12.38a)$$

$$\left. + (E_N + d) \left[\sum_{z \in S} k(z) \sum_{j \in J} x_j + \sum_{z \in S} r(z) \omega_j \right] \right\} \rightarrow \min \quad (12.38b)$$

причем

$$w_j = \begin{cases} 0, & \sum_{j \in J} x_j = 0 \\ 1, & \sum_{j \in J} x_j > 0 \end{cases}$$

$$\sum_{i \in E} a_i(z_i) x_{ij} > A_i, \quad \forall i \in J; \quad (12.38)$$

$$\sum_{i \in J} \sum_{j \in E} b_j(z_j) x_{ij} > B; \quad (12.40)$$

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i \in S} k_i(z_i) \varphi \left(\sum_{j \in J} x_{ij}, a_j \right), \sum_{j \in E} x_{ij} \\ \sum_{i \in S} k_i(z_i) \sum_{j \in J} x_{ij} + \sum_{i \in S} r_i(z_i) \omega_i \end{aligned} \right\} < K \quad (12.41a)$$

$$z_i \geq z_{i \min}, \quad -z_i \geq -z_{i \max}, \quad \forall i \in S; \quad (12.42)$$

$$\sum_{i \in E} x_{ij} \leq x_{ij}^0, \quad \forall j \in K; \quad (12.43)$$

$$z_i = \begin{cases} 1, & \text{если } z_i \in [z_{i \min}^0, z_{i \max}^0]; \\ 0, & \text{если } z_i \in [z_{i \min}^0, z_{i \max}^0], \\ x_{ij} \geq 0, \quad \forall i \in J, \quad j \in S. \end{cases} \quad (12.44)$$

Дополнительные пояснения к предложенной модели. Функция критерия — произвольная левая (12.38a), (12.38b), (12.38c), как и прежде, учитывает различные приоритеты двумя способами: через функцию серьезности φ в виде сформированных допустимых значений в критерий и случае, если суда с характеристиками z_i используются хотя бы на одной линии, т. е. при

$$\sum_{i \in E} x_{ij} > 0.$$

Ограничения, связанные с грузопотоками, контролируют уровень заполнения довода и длину его эксплуатационной по содержанию аналогично соответствующим ограничениям модели первого этапа.

Условия (12.42) характеризуют общие ограничения величин характеристик флотов судов. Например, в планируемом периоде невозможно создание судов $N = N_{\max}$ по условиям постройки, притом капитала и программы $DW \leq DW_{\max}$, $\tau_i \geq \tau_{i \min}$ и т. п.

Условия (12.43) обеспечивают ограничения по числу судов определенного типа, исходя из возможностей судостроительной отрасли в планируемом периоде. Это учитывается увеличением диапазона характеристик судов $[z_{i \min}^0, z_{i \max}^0]$ в зависимости от доступного числа судов с характеристиками, принадлежащими этому диапазону. Например, в планируемом периоде возможны постройбы по увеличению заказа-строитель только определенной численности судов $N_{\max}^0 \leq DW \leq DW_{\max}$, аналогично для $N_{\max}^0 - N \leq N_{\max}^0$ (по условиям вставки доплат) и т. д. Таким образом, подобные ограничения формируются для различных возможностей, модальностей и других характеристик и особенностей судов.

Для реализации предложенной математической модели необходимо иметь функции $c_j(z)$, $k_i(z)$, $a_j(z)$, $b_j(z)$. Для их построения можно использовать процедуры и формулы, примененные в практике выполнения экономических обоснований [51]. Эти процедуры и формулы связывают эксплуатационно-экономические показатели и стоимость судна с составными элементами, модальностью, спо-

ростью и др., для расчета которых удобно пользоваться приближенными зависимостями теории проектирования судов (гл. 1—10). Указанные функции могут быть перенесены в табличной форме и на задачи первого этапа, если в ней среди судов-претендентов было достаточное количество вариантов, отличающихся оптимизируемыми на данном этапе характеристиками. Однако, учитывая характер задачи (величина размерности и включение в число оптимизируемых параметров непосредственно характеристики судов), предпочтительнеешей первой путь построения функций с учетом по возможности большего числа реальных особенностей линий перевозок, портов и специфических грузов, влияющих на выбор оптимальных характеристик.

Анализ модели и последовательность решения задачи. Иллюстрация задачи является нелинейной по критерию и ограничениям. В отложении оптимизируемых параметров — это задача частично целочисленного типа. Нелинейность задачи обусловлена как учетом значения серьезности, так и функциями $c_j(z)$, $k_i(z)$, $a_j(z)$, $b_j(z)$. Критерий (12.38) задачи является вогнутой функцией. Это относится и к эксплуатационным расходам, и к стоимости судов. В варианте (12.38b) имеем вогнутую функцию критерия с эфиркованными доплатами. Область допустимых решений (12.39) — (12.43) невыпукла (аналогично 12.4).

Оптимизируемые параметрами в задаче являются: $|S|$ — число типов судов (целочисленная переменная), необходимое для осуществления перевозок; z_i — вектор характеристик судов каждого типа (его составляющие в большинстве случаев непрерывные величины); x_{ij} — потребное количество судов для каждой линии. Числа будем трактовать как непрерывные. Суммарное число судов каждого типа $\left(\sum_{j \in E} x_{ij} \right)$ должно быть целым. Очевидно, что имеет место

никогдастремляемая непрерывно целочисленная задача математического программирования. Для приближенного решения предлагается следующий метод (вариант задачи с функцией серьезности).

Решается система линейных задач с непрерывными переменными. Эта система включает $|S|$ задач, соответствующих решениям обеспечить пополнение флота одним типом судов — $|S| = 1$, двумя — $|S| = 2$, тремя — $|S| = 3$ и т. д. Максимальное возможное число таких задач равно количеству линий перевозок. Средние величины критерия для каждого значения $|S|$ позволяют выбрать рациональное число типов судов пополнения.

Каждая из $|S|$ задач, соответствующая фиксированному значению $|S|$, решается в постановке (12.38a), (12.39), (12.40), (12.41a), (12.42), (12.44). При этом не учитываются условия (12.43), а также условия целочисленности суммы $\sum_{j \in E} x_{ij}$ по причинам, изложенным

в 12.4. Решение в задаче проверяется на выполнение ограничений (12.42). Если они выполняются, то получают локальный вид условия локальной точки (решения). В противном случае выполняется следующее приближение к задаче. Для этого в число ограничений

добавляется модифицированное условие (12.43):

$$\sum_{j \in J^*} x_{ij} \leq x_{ij}^* \quad (12.45)$$

где J^* — подмножество линий, на которых работают суда с характеристиками $z_{ij} \in [z_{ij}^{\min}, z_{ij}^{\max}]$, но число их превышает допустимое по условию (12.43); x_{ij}^* — максимально допустимое число судов, используемых на линиях $j \in J^*$. Если в результате нового решения характеристики судов z_{ij} на этих линиях укладываются в тот же k диапазон, то это значит, что получено приближенное решение к задаче. В противном случае процесс искусственно останавливается, и последнее решение принимается за решение локальное. Поскольку в задаче заданы многоэкстремальными (минимизируется вогнутая функция на непустом множестве), оптимальная программа достигается на различных жемчужных точках с последующим выбором наилучшего из локальных оптимумов.

Для решения каждой из k задач может быть использован в принципе любой алгоритм нелинейного программирования. Рациональнее, тем не менее, при выборе алгоритма учесть специфику математической модели, заключающуюся в том, что большая часть переменных (x_{ij}) входит в критерий и ограничения линейно. С учетом этого можно рекомендовать в первую очередь алгоритмы, использующие на каждом шаге линейно-программные методы. Один из таких алгоритмов излагается ниже. Рассматриваемые далее результаты машинных экспериментов получены с помощью именно таких алгоритмов.

В варианте с задачей с критерием (12.386) процесс решения имеет особенность, связанную с учетом фиксированных доплат. Как показала опыт экспериментальной эксплуатации моделей (12.38) — (12.44), часто при последовательном решении с задан обнаруживаются такие значения $|S_{\text{max}}|$, что при $|S| > |S_{\text{max}}|$ суда некоторых типов на линиях не используются совсем; число таких типов равно $|S| - |S_{\text{max}}|$. Следовательно, проектировать их и строить не следует. Однако в критерий с задан фиксированные доплаты включены для судов всех $|S|$ типов. Поэтому требуется дополнительные приближения, в которых по критерию удаляются члены $r(x_{ij})$ для тех S , которым соответствует $\sum_{i \in I} x_{ij} = 0$. Такие приближения продолжаются до «заканчивания» (см. 12.4).

Алгоритм для локального поиска в задачах нелинейного программирования. Данный алгоритм основан на методе опорной гиперплоскости, являющемся разновидностью известных методов отсечений и «скользящей плоскости» [68, с. 89]. Пусть имеются задача

$$f(x_1, \dots, x_n) \rightarrow \min; \quad (12.46)$$

$$g_s(x_1, \dots, x_n) \leq b_s, \quad \forall s=1, \dots, m; \quad (12.47)$$

$$x_{i \min} \leq x_i \leq x_{i \max}, \quad \forall i=1, \dots, n, \quad (12.48)$$

приним все x_i непрерывные.

Предполагается, что все функции непрерывно дифференцируемы, а множество допустимых решений не пусто, т. е. существует хотя бы одна внутренняя точка, для которой все ограничения (12.47), (12.48) выполняются строго. Кроме того, если точка $(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n)$ находится на границе и $g_s(x_1, \dots, x_n) = b_s$, то $\nabla g_s(x_1, \dots, x_n) \neq 0$. Введен новую переменную x_{n+1} и заменим исходную задачу (12.46) — (12.48) эквивалентной:

$$x_{n+1} \rightarrow \min; \quad (12.49)$$

$$g_s(x_1, \dots, x_n) \leq b_s, \quad \forall s=1, \dots, m; \quad (12.50)$$

$$f(x_1, \dots, x_n, x_{n+1}) \leq 0; \quad (12.51)$$

$$x_{i \min} \leq x_i \leq x_{i \max}, \quad \forall i=1, \dots, n. \quad (12.52)$$

Эта задача — с линейной функцией критерия и нелинейными функциями ограничений.

Метод опорной гиперплоскости заключается в том, что задача (12.49) — (12.52) заменяется линейной посредством разложения функций (12.50), (12.51) в ряд Тейлора. В точке, являющейся решением линейной задачи, проверяются ограничения (12.50) — (12.51). Если они выполняются, то будет получено решение исходной задачи. Если какие-либо ограничения нарушены, то выбирается дегитрирующее ограничение по максимуму невязки и для него строится граничная точка (\bar{x}_i) из условия $g_s(x_1, \dots, x_n) = b_s$. В этой точке дегитрирующее ограничение линейно аппроксимируется и добавляется к ограничениям предыдущей линейной задачи. Процесс продолжается до получения точки, принадлежащей области допустимых решений. Метод сходится, если функция $f(x_1, \dots, x_n)$ выпукла вниз* и множество решений (12.47) не является выпуклым.

Как уже отмечалось, в рассматриваемых здесь задачах чаще всего допустимая область невыпукла. Кроме того, затруднительно прогнозировать свойства функции критерия. Предлагаемый далее алгоритм, основанный на методе опорной гиперплоскости, содержит некоторые дополнения, позволяющие получить локальный или условно локальный оптимум без ограничений на свойства функций $f(x_1, \dots, x_n)$, $g_s(x_1, \dots, x_n)$ в указанном смысле, а именно:

если решение линейной задачи принадлежит области допустимых решений, процесс не останавливается, а повторяется из полученной точки, что позволяет продолжать поиск в случае вогнутой функции критерия;

перед окончанием процесса поиска проводится искусственное сужение области (12.52), что дает возможность продолжать поиск в задачах с невыпуклой областью допустимых решений;

* В [68] указывается, что достаточно, чтобы функция была узковыпуклой.

укладывается процедура получения граничной точки по лимитирующему ограничению.

Алгоритм. Пусть имеются точки: внутренняя $\{x_i^{(0)}\} \in (12.47)$, (12.48) и внешняя $\{x_i^j\} \in (12.47)$, (12.48).

1. Процедура решения линейной задачи:

$$x_{i+1} \rightarrow \min; \quad (12.53)$$

$$g_i(x_1, \dots, x_n) + \sum_{j=1}^m \frac{\partial g_i(x_1, \dots, x_n)}{\partial x_i} (x_i - x_i^j) \leq b_i; \quad (12.54)$$

$$f(x_1, \dots, x_n) + \sum_{j=1}^m \frac{\partial f(x_1, \dots, x_n)}{\partial x_1} (x_1 - x_i^j) - x_{i+1} \leq 0; \quad (12.55)$$

$$x_{i \min} \leq x_i \leq x_{i \max}. \quad (12.56)$$

Пусть $\{x_i^j\}$ — решение этой задачи.

2. Если $\{x_i^j\} \in (12.53) - (12.52)$, то необходим переход к п. 3, если нет, то нужен переход к п. 4.

3. Принимаем $\{x_i^j\}$ за $\{x_i^0\}$ и переходим к п. 1. Одновременно запоминаем $\{x_i^j\}$, $f^* = f(x_1^j, \dots, x_n^j)$.

4. Определяем лимитирующее ограничение \hat{i} по признаку: \hat{i} соответствует $\Delta_{\max} = \max\{\max(g_i - b_i, f^* - x_{i+1})\}$.

Если $\Delta_{\max} = \max(g_i - b_i)$, то следует перейти к п. 5;

если $\Delta_{\max} = f^* - x_{i+1}$, то — к п. 6.

5. Строим точку $\{x_i^1\}$ такую, что $g_i(x_1, \dots, x_n) = b_i$ при $x = \hat{i}$. Используем следующий прием. Пусть $x(t) = x^0 + t(x^1 - x^0)$.

При $t = 0$ $x(0) = x^0$, $g(x(0)) = g_i(x^0)$.

При $t = 1$ $x(1) = x^1$, $g(x(1)) = g_i(x^1)$.

Для любого $t = \bar{t} \in [0, 1]$ рассчитываем g_i в точке $x(\bar{t})$. По трем точкам $\{0, \bar{t}, 1\}$ определяем коэффициенты параболы $g_i(t) = at^2 + bt + c$. Решая $g_i(t) = 0$, получаем $t = \bar{t}$ и $x(\bar{t}) = x_0 + \bar{t}(x^1 - x^0)$.

В точке $\{x_i\}$ строим сравнительные

$$g_i(x_1, \dots, x_n) + \sum_{j=1}^m \frac{\partial g_i(x_1, \dots, x_n)}{\partial x_i} (x_i - x_i^j) \leq b_i. \quad (12.57)$$

Решаем задачу (12.53) — (12.57) и переходим к п. 2.

6. В точке $\{x_i^1\}$ строим ограничение

$$f(x_1^1, \dots, x_n^1) + \sum_{j=1}^m \frac{\partial f(x_1^1, \dots, x_n^1)}{\partial x_1} (x_1 - x_i^j) - x_{i+1} \leq 0. \quad (12.58)$$

Решаем задачу (12.53) — (12.56), (12.58) и переходим к п. 2.

7. Указанный процесс продолжается до получения $f^* > f^{*+1}$. Точку $\{x_i^{(k)}\}$ принимаем за $\{x_i^j\}$ и строим новые границы

$$x_i \leq x_i \leq \bar{x}_i, \quad (12.59)$$

где

$$\bar{x}_i = \min\{x_{i \max}, x_i^* + k(x_{i \max} - x_{i \min})\}$$

$$x_i = \max\{x_{i \min}, x_i^* - k(x_{i \max} - x_{i \min})\}$$

и k — малое число из интервала $[0, 1]$.

Решаем задачу (12.53) — (12.55), (12.60). Пусть $\{x_i^j\}$ оста решение этой задачи.

8. Если $f(x_1, \dots, x_n) < f^{*+1}$, то процесс повторяется с п. 2. Если нет, то значит получено решение^{*}.

Накопленный опыт и существо метода, предложенного в основу алгоритма, позволяют считать его сравнительно экономичным по числу расчетов функций критерия и ограничений. Во-первых, число шагов, на каждом из которых решается задача линейного программирования, конечно. Во-вторых, только в 20–30% общего числа шагов требуется вычисление производных всех функций ограничений и критерия (по алгоритму — это переход к п. 1). В остальных случаях производные необходимо рассчитывать для лимитирующего ограничения. Таким образом, алгоритм может оказаться эффективным в задачах со значительным числом переменных и ограничений и большим временем расчета функций f и g_i .

В последние время происходит дальнейшее совершенствование и развитие методов оптимизации (полноразмерного), и прежде всего улучшение математических моделей с целью более полного учета всех экономических и технических последствий принимаемых решений. Кроме того, происходит сбор и разработка рациональных в вычислительном плане алгоритмов оптимизации, обеспечивающих гарантированную сходимость результатов, составление эффективных программных комплексов. Эти направления свойственны оптимизационным задачам в любой отрасли промышленности, решение которых ведется с помощью методов математического

* В задачах с весьма широкой областью может потребоваться дополнительное увеличение числа k с повторением процесса, начиная с п. 7.

программирования. Существуют и специфические пути совершенствования задач пополнения флота. Важнейшими из них являются развитие вопросов контроля устойчивости задач (стабильности результатов при малых отклонениях исходных данных), автоматизации подготовки исходных данных, разработка аппарата анализа оптимального решения, глубокая уценка определении пополнения флота с размещением заказов судов по заводам-строителям, а также учет неопределенности при оптимизации судов.

1. Алексеев Н. П. Опыт фактического применения системы струйных образцовый судов. — Морской сборник, 1879, № 12, с. 103—106.
2. Алексеев В. В. Проектирование кораблей. — Наука и жизнь, 1947, № 9, с. 15—19.
3. Алексеев В. В. Применение метода наименьших квадратов при расчетном определении заданной остойчивости. — Судостроение, 1963, № 6, с. 24.
4. Алексеев В. В. Применение формулы Сэйлера для определения высоты метацентра по высоте. — Судостроение, 1966, № 2, с. 11—14.
5. Алексеев В. В. Замечания по выбору коэффициента обшей высоты быстроплывущих судов. — Судостроение, 1966, № 10, с. 17—18.
6. Алексеев В. В. Развитие теории проектирования судов на кораблестроительном факультете. — Труды ЛКИ, 1967, кн. LV, с. 15—24.
7. Алексеев В. В. Овальные и неэллиптические высоты как критерии характеристик остойчивости. — Судостроение, 1975, № 5, с. 10.
8. Алексеев В. В. 50 лет Ленинградского кораблестроительного института и развитие теории проектирования судов. — Труды ЛКИ, Проектирование судов, 1980, с. 3—8.
9. Алексеев В. В. Связь коэффициента Норвига с коэффициентом использования водоизмещения. — Северские проблемы проектирования судов. Сб. научных трудов. Л.: Изд. ЛКИ, 1982, с. 3—6.
10. Алексеев В. В., Богданов А. А. К вопросу о выборе длины шпангоутной четки. — Труды ЛКИ, Проектирование судов, Л., 1979, с. 9—13.
11. Алексеев В. В., Богданов А. А., Маркина Н. Б., Шибалов А. Н. Методы построения и согласования судовой поверхности с помощью SPM. Л.: Судостроение, 1978.
12. Алексеев В. В., Гайконов А. Н., Захаров А. С., Семенов Ю. Н. Определение положения центра тяжести судорезных судов и заданных отобразивших элементов. — Судостроение, 1977, № 3, с. 5.
13. Алексеев В. В., Гайконов А. Н., Семенов Ю. Н., Захаров А. С. Расчет нагрузки при оптимизации элементов судорезных судов. — Судостроение, 1976, № 7, с. 8.
14. Алексеев В. В., Гайконов А. М., Шаров Б. А., Чиликин И. В. Сравнение системных методологии проектирования судов. — В кн.: Итоги науки и техники. Судостроение. Т. 7. Теория и практика проектирования морских торговых судов. М., ВНИИТРИ АН СССР, 1975, с. 5—26.
15. Алексеев В. В., Лавкин Н. П., Ершовая Н. С. Расчеты массы корпуса судорезных судов. — Судостроение, 1975, № 6, с. 8—9.
16. Алексеев В. В., Семенов Ю. Н. Расчет остойчивости судорезных судов на предварительной стадии проектирования. — Труды ЛКИ, Проектирование судов, 1980, с. 24—37.
17. Алексеев В. В., Шаров Б. А. Развитие теории и методологии проектирования судов и собственной ветви. — Судостроение, 1977, № 4, с. 10.
18. Алексеев В. В., Шаров Б. А., Чиликин И. В. Зависимость длины корпусных судов от их скорости. — Судостроение, 1971, № 3, с. 10—13.

19. Афан В. В., Царев В. А., Чепалов Н. В. Выбор коэффициента обшей вязкости при проектировании современных морских судов.— Судостроение, 1972, № 2, с. 12—16.
20. Афан В. В., Царев В. А., Чепалов Н. В. Преположение огибающей кривой судовой энергетической установки.— Судостроение, 1972, № 5, с. 6—11.
21. Афан В. В., Царев В. А., Чепалов Н. В., Академик В. Л., Падурин Г. И. Проектирование судов.— Судостроение, 1972, № 1, с. 3—6.
22. Балацкий А. И. Проектирование кораблей (основные методологии проектирования кораблей). Изд. 2-е. М., Вoenиздат, 1964.
23. Бегданов Б. В., Стручков А. В., Швакин М. Т., Васильев К. А. и др. Буксирные суда (проектирование и конструкция). Л., Судостроение, 1974.
24. Болынский К. П. Курс проектирования судов, подготовленный проф. К. П. Болынским для студентов кораблестроительного отделения, Общеполитехнического института, Сиб., Изд. кафедр инженерной студияры Политехнического института, 1965.
25. Бронников А. В. Определение боковых адриатических коэффициентов на начальных этапах проектирования судов.— Судостроение, 1964, № 7, с. 9—13.
26. Бронников А. В. Особенности проектирования морских транспортных судов. Л., Судостроение, 1971.
27. Бронников А. В. Основные направления науки о проектировании судов.— Судостроение, 1973, № 4, с. 3—6.
28. Бронников А. В. Определение энергетической вместимости судов на начальных этапах разработки проекта.— Труды ЛКИ, 1973, с. 14—25.
29. Бронников А. В., Буканов В. В., Чепалов Н. К. Систематизированные материалы по судам с судовой энергетической установкой. Учебное пособие. Л., Изд. ЛКИ, 1980.
30. Бурбов Н. Г. Строительная механика корабля. Ч. 1. Сиб., Институт Морской инженерии, 1912.
31. Бурбов Н. Г. Об одном методе определения главных размеров проектируемого судна. Изв. Восточной Сибири морских инженеров, 1915, т. 1, с. 243—254.
32. Бурков А. В. К вопросу о выборе вместимости балластных цистерн.— Тр. ЛКИ. Проектирование судов. Л., 1972, с. 56—58.
33. Векслер В. М. Некоторые вопросы проектирования танкеров. Л., Судостроение, 1967.
34. Векслер В. М. Определение основных элементов и характеристик научно-исследовательского судна на разных стадиях проектирования.— Судостроение, 1961, № 3, с. 7—9.
35. Велас Л. Ф., Бурбов Н. Г. Вопросы в теории и практике проектирования судов. Афан В. В., Хазанов О. А., Царев В. А., Чепалов Н. В.— Судостроение, 1972, № 1, с. 46—50.
36. Воеводино Н. Ф., Тихонова О. Ю. Анализ составленных нагрузок судов при их эксплуатации в водном режиме.— Судостроение, 1972, № 11, с. 4—9.
37. Гайдаков А. И. Применение современных математических методов в проектировании судов. Учебное пособие. Л., Изд. ЛКИ, 1982.
38. Гайдаков А. И., Царев В. А. Расстояние переборки и расчет вместимости нефтехранилищ при проектировании с помощью ЭВМ.— Архитектура и проектирование судов. Москва, об., Владивосток, 1977, вып. 1, с. 31—61 (ДВГУ).
39. Грузовые суда (сводный справочник). Евстафьев В. А., Варшав П. Г., Николаев В. И., Шапова М. Г. Л., Судостроение, 1971.
40. Данил М. Ф. Выбор основных характеристик судовых машин основного назначения.— Сводные справочники проектирования судов. Сб. научных трудов. Л., Изд. ЛКИ, 1982, с. 74—83.
41. Данилов А. В. Определение площадей и объема помещений востроенных грузовых судов.— Судостроение, 1978, № 9, с. 6.
42. Дорин В. С. Общее проектирование системы автоматизированного проектирования судов.— Судостроение, 1973, № 9.
43. Дорин В. С. Автоматизация обработки информации в судостроении.— Судостроение, 1979, № 7, с. 30.
44. Епанчин В. В. Вероятностные методы в стравляющей механике корабля. Л., Судостроение, 1965.
45. Живиков Ж. К. Коэффициентные суда для перевозки нефти и газомоторных грузов. Л., Судостроение, 1970.
46. Захаров А. С. Особенности проектирования судов с газомоторной трансмиссией. Учебное пособие. Л., Изд. ЛКИ, 1980.
47. Кабанов Ф. М., Пустошкин А. Ф., Шумилов В. М. Пропитывание корпуса судов. Л., Судостроение, 1972.
48. Калашов В. И., Тетов П. И., Южаков Ф. Л. Судовые энергетические установки. Л., Судостроение, 1969.
49. Кароткин И. М. Боевые повреждения надводных кораблей. Л., Судостроение, 1960.
50. Кароткин И. М., Селевков Э. Ф., Крайнов В. А., Афанасов И. Иероглифовичи, М., Вoenиздат, 1972.
51. Краев В. И., Суляев О. К., Лавинин Э. Л. Энергетические особенности при проектировании морских грузовых судов. Л., Судостроение, 1973.
52. Давыдов В. А. Основы проектирования морских коммерческих судов. М.—Л., Гострансиздат, 1952, к. 1; 1953, к. 2.
53. Демин В. А. Определение вместимости энергетической установки на разных стадиях проектирования.— Судостроение, 1969, № 3, с. 12—14.
54. Динайдов А. Проектирование обводов транспортных судов. Пер. с англ. Л., Судостроение, 1965.
55. Дювакис Р. Габель «Габельман». Расследования, проведенные в Англии в Америке. Сиб., 1913.
56. Машков Д. Ч. Теория и техника проектирования кораблей. Пер. с англ. И., Вoenиздат, 1960.
57. Мельников А. Т., Мурахов Л. И. Автоматизация проектирования судов.— В кн.: Итоги науки и техники. Судостроение, т. 7, Теория и практика проектирования морских гражданских судов. М., ВИНИТИ АН СССР, 1975, с. 83—99.
58. Машков А. Т., Мухомов Л. И., Павлов В. М. Оптимизация судов.— В кн.: Итоги науки и техники. Судостроение, т. 7, Теория и практика проектирования морских гражданских судов. М., ВИНИТИ АН СССР, 1975, с. 39—82.
59. Мельник Э. Столкновение в океане. Пер. с англ. И., Мирской транспорт, 1962.
60. Мурдов В. И., Кунев В. Л., Макашев В. И., Осипович Е. М. Некоторые экспериментальные исследования метода вычисления волудов в области обшивки обтекаемой информации.— Космические исследования, 1968, т. 6, вып. 4, с. 592—614.
61. Нгуен Куанг Вина. О выборе главных размеров и формы обшивки промышленных судов.— Труды ЛКИ. Проектирование судов. Л., 1979, с. 46.
62. Невед Л. М. Теория проектирования судов. Л., Судостроение, 1968.
63. Невед Л. М. Проектирование формы судна и построение энергетического чертежа. Л., Судостроение, 1982.
64. Невед Л. М. Проектирование морских судов. Ч. 1. Методика определения элементов проектируемого судна. Л., Судостроение, 1964.
65. Невед Л. М. Оптимальность судна и его инженерия на водном режиме моря. Ч. 1. Проектирование морских судов. Л., Судостроение, 1967.
66. Невед Л. М. Проектирование морских судов. Выбор коэффициентов формы и определение вместимости энергетической установки проектируемого судна. Л., Судостроение, 1970.
67. Павлов В. М. Критерии для согласованной оптимизации подсистем судна. Л., Судостроение, 1976.
68. Павлов В. М. Оптимизация судов. Л., Судостроение, 1983.
69. Павлов В. М., Павлов Ю. И. Вероятностная оценка экономической эффективности судов. Л., Судостроение, 1978.
70. Павлов В. М., Селевков Э. И. Системы автоматизированного проектирования судов. Учебное пособие. Л., Изд. ЛКИ, 1983.

71. Валькович В. Л. Основы проектирования морских коммерческих судов. ЦДРИ, 1956, ч. 1, 1957, ч. 2.

72. Валькович В. Л. Теория проектирования судов, ч. 1. Общие вопросы проектирования. Л.—М., ОНТИ, 1935.

73. Валькович В. Л. Теория проектирования судов, Л., Изд. ЛКИ, 1958, ч. 1; 1959, ч. 2.

74. Влаской А. А. Объем и вес грузов, перевозимых морем. М., Морской транспорт, 1958.

75. Проектирование и постройка стальных торговых судов/Пер. с англ. под ред. Д. Арноста, Л., Судостроение, 1959.

76. Проектирование судов с использованием ЭВМ (зарубежный опыт судостроения). Л., ЦНИИ Фрейд, 1979.

77. Райко А. Н. Основные общие характеристики и аспекты проектирования судов. Л., Судостроение, 1978.

78. Райко А. Н., Семеновичев Н. Е. Проектирование промышленных судов. Л., Судостроение, 1981.

79. Райко А. Н. Метод элементов в проектировании. — Судостроение, 1972, № 3, с. 7—8.

80. Самойлова А. В. Приближенные формулы для расчета ледяной остойчивости судовых корпусов. — Судостроение, 1972, № 7, с. 11—12.

81. Савельев-Тан-Шанский В. В. Сплавки и деформации корабля. Л., Судостроение, 1960.

82. Савельев-Тан-Шанский В. В., Баланчицкий С. Н., Колосовка А. Н. Корабли корабля. Л., Судостроение, 1969.

83. Савельев-Тан-Шанский В. А. Характеристика военного застроения судна. — Судостроение, 1982, № 5, с. 5.

84. Савельев-Тан-Шанский В. А. Анализ конструктивных характеристик военных кораблей для транспортных судов. — Современное состояние проектирования судов, Сб. науч. трудов, Л., Изд. ЛКИ, 1992, с. 42.

85. Савельев Л. Г. Применение дифференциального метода при определении жесткости основной конструкции судового корпуса. — Труды ЦНИИМФ, 1951, вып. 35, с. 69—76.

86. Сидячий А. Г. Исследование гидродинамических расчетов при оптимизации структуры морского грузового флота. М., Транспорт, 1973.

87. Токларс Б. Д. Формулы для определения длины судна. Л., Судостроение, 1974, № 7, с. 11.

88. Толоцкий Н. С. Исследование влияния габаритных элементов конфигурации судна на его грузоподъемность. — Теория и практика судостроения, 1927, № 1; 1928, № 2; 1930, № 3.

89. Халада Д. Ж. Немецкие и датские морские проектировщики. М., Мир, 1967.

90. Хлопчовицкий Л. Проектирование военных проектировщиков. М., Мир, 1975.

91. Худяков Л. Ю. Исследованиями проектирования кораблей (автоматизация и проектирование). Л., Судостроение, 1980.

92. Царев В. А. Опыт в использовании теории проектирования судов. — Судостроение, 1972, № 3, с. 60—62.

93. Царев В. А. Уточнение расчетной длины флота в проектировании формул в отношении остойчивости проектируемого судна. — Труды ЛКИ. Проектирование судов, 1973, с. 26—29.

94. Шварц Е. Е. Военные флоты. Ред.-изд. отд. Военно-морского РКФФ. Л., 1968.

95. Яковлев С. Т. Неполноточность измерения кораблей. М., Воениздат, 1934.

96. Fiebels K. Vorausberechnung der Masse und der Lage Massenmittelpunkte des Stahlschiffkorpus vor general-und/or-Schiffen. — Schiffbautechnik, 1963, № 10, с. 496—504.

97. Schmidt W. Das Bauverfahren als Hilfsmittel für den Bau der Schiffe. — Jahrbuch des Schiffbautechnischen Gesellschaft, 1924.

98. Volant Y. Supporting Hyperplane Method for United Program. — Operation Res., 1967, XV, N 1, p. 147—152.

Балло-индикаторы 243, 245—248

Всплывание конструктивных, проектирование 241—243

— средние, быстротечность 218—223

Вместимость:

балластных цистерн 110—114

судов балласт теоретическая 47—92

судов регистрации 114—116

Водоизмерение:

измер 20—21

измер 17—19

торпедного судна 17—18

Грузоподъемность удельная 99—103

Длиней 19

Застроение нормы 229—232

Коэффициент:

— адмиралтейский 156—200

— использованный водоизмерения 22—25

— использованный скорости 206—208

— Нормана 56—61, 63—65; 80—83

— Нормана и использования водоизмерения по чистой грузоподъемности, связь между ними 66

— общей емкости 220—226

— длины конструктивной вытеснения 128—130

— емкости индекса-индикатора 128—129

— длины остойчивости 223—228

— длины по Нормалу, связь между ними 124—126

— определения объема водоизмерения при известном водоизмерении 96—97

— продольной скорости 128, 218—220

Метатеоретическая емкость

— — — остойчивости 142—152

— — — поперечной 142—152

Метатеоретический радиус 138—141

Методы получения статистических формул 137—139

Мощность:

затрачена 206—228

потреблена 194—198

расчет по гидродинамическим формулам 216—220

— — — формулы адмиралтейских коэффициентов 196—200

История судна:

разработка 16—17

расчет 28—32

Индикатор борт:

— — — балласт 172—173

— — — в чистой остойчивости 191—194

— — — вытеснения 178—181

— — — остойчивости 178—181

— — — скорости 178—181

Использование, объемности, 170, 184—198

Норман остойчивости:

форма 232—236

Оптимизация элементов судна: 272—274

методы 275—280

перспективы развития 280—285

основная флота 285—289

— флота; второй этап 289—298

Остойчивость при больших углах крена; обеспечение 166—169

Относительная длина 213—218

Перекрытия 184—189

Плотность:

затрачена 170—172, 173—181

удельная 83—84

Поперечный объем удельный 99—103

Проектирование судов 12—15

Размеры ст 57—70, 79—80
Скорость
— критическая 204—206
— эксплуатационная 206—208
Средства
по определению 209—213
— по испытаниям, ее проектированию 241—243
Теоретический метод:
история 217—241
построение графиков способом 246—248
— алгебраическим способом 248—251
— по единому дифференциальному выражению 251—255
— по И. Я. Яковлеву 243—244
— по лучшему методу Г. Е. Павленко 255—257
— по параболическому методу 253—254
— по строкам по количеству строк в теоретическом среднем судна-прототипа 250—253
Теория проектирования судов:
методы 10—12
научный аппарат 258—262
проект 4—10
связь с другими дисциплинами 10—12, 258—262
Удобрствования судна 104—106, 110—114
Уравнения:
коэффициента Лессона 103—104

— величины судов 108—110
— судна с двойными бортами 103—104
— суднообразных судов с кормовым развалом МС 104—106
— суднообразных судов с продольным развалом МС 107—108
— суднообразных судов со средним развалом МС 97—99
коэффициента использования водоизмещения 56—58
— нагрузки 53—54
— — в дифференциальной форме 58—63, 72—79
— — в функции водоизмещения 55—56
— — в функции главных размеров и коэффициента обшивки корпусом 70—72
— обшивки (жесткости) 92—95
— остойчивости в алгебраической форме 154—161
— — в дифференциальной форме 161—165
— плановости 83—84
Центр тяжести:
определения 131—138
получения по длине судна 223—229
Ширину наибольшего сечения: 245—246
получения по длине судна 223—229

ОТ АВТОРА	3
ВВЕДЕНИЕ	4
1. НАГРУЗКА СУДНА	16
1.1. Общие сведения	16
1.2. Разделы нагрузки	17
1.3. Водоизмещение порожнего судна, закон водоизмещения	17
1.4. Деловит	19
1.5. Виды водоизмещения	20
1.6. Коэффициенты использования водоизмещения	22
2. ЗАВИСИМОСТЬ МАССЫ ОТДЕЛЬНЫХ РАЗДЕЛОВ НАГРУЗКИ ОТ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СУДНА	26
2.1. Постановка задачи	26
2.2. Нагрузка по разделу «Корпус»	27
2.3. Постоянный расчет нагрузки по разделу «Корпус»	30
2.4. Нагрузка по разделу «Устройства судна» и «Обшивка»	38
2.5. Раздел нагрузки «Устройства корабельных»	39
2.6. Нагрузка по разделу «Электроэнергетическая система, внутреннее судно и туалеты», «Оборудование»	42
2.7. Нагрузка по разделу «Вспомогательные», «Снабжение и инструменты»	43
2.8. Разделы нагрузки «Вспомогательные» и «Постоянные жидкие грузы»	43
2.9. Раздел нагрузки «Газы водопомещения и остойчивости»	44
2.10. Раздел «Шпация, проволочка, лесы, расходные материалы, расходные жидкие среды»	48
2.11. Раздел нагрузки «Грузы перевозимый»	49
2.12. Раздел нагрузки «Примесные жидкие грузы», «Жидкий балласт», «Грузы, снабжение, запасные дополнительные»	49
2.13. Раздел нагрузки «Газовый топливный, вода и воздух»	50
3. УРАВНЕНИЕ НАГРУЗКИ В ФУНКЦИИ ВОДОИЗМЕЩЕНИЯ. ОБЪЕДНЕНИЕ ВОДОИЗМЕЩЕНИЯ	53
3.1. Постановка задачи	53
3.2. Составление и решение уравнения нагрузки	55
3.3. Некоторые формы уравнения нагрузки. Упрощенные коэффициенты использования водоизмещения. Составление предварительной таблицы нагрузки проектируемого судна	56
3.4. Влияние применения шарпового и конических масс на нагрузку. Дифференциальная форма уравнения нагрузки в функции водоизмещения. Коэффициент буртиль	58
3.5. Выделение предельных масс при заданных параметрах	61
3.6. Выделение коэффициента Нормана	63

3.7. Связь между коэффициентами η , и η_c	60
4. ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРЕНИЙ СУДА, УРАВНЕНИЕ НАГРУЗКИ В ФУНКЦИИ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРЕНИЙ И КОЭФФИЦИЕНТА ОБЩЕЙ ПОЛНОТЫ	67
4.1. Пути определения главных размерений и коэффициента общей полноты судна при известном водоизмещении	67
4.2. Уравнение нагрузки в функции главных размерений судна и коэффициента общей полноты. Его определение в зависимости от дифференциальной формы уравнения масс, выраженных в функции главных размерений и коэффициента общей полноты	70
4.3. Вычисление произвольной массы металлов и топлива по коэффициенту общей полноты и главным размерениям	72
4.4. Различные уравнения масс, заданных в функции коэффициента общей полноты и главных размерений	75
4.5. Уточнение размерений, коэффициента общей полноты и водоизмещения	79
4.6. Вычисление параметров нагрузки при известных размерениях форм судна. Коэффициенты Нортона при таких параметрах	80
4.7. Отношение формул, включающих малые приращения значений	83
5. ВМЕЩЕННОСТЬ	87
5.1. Полная теоретическая вместимость судна	87
5.2. Уравнение объема (вместимости). Определение отклонения полной вместимости в осадке	92
5.3. Коэффициент преобразования объема водоизмещения при изменении вместимости	95
5.4. Уравнение вместимости сухогрузных судов со средним расположением машинного отделения	97
5.5. Удельная грузоемкость, удельный погрузочный объем. Связь удельной грузоемкости с V	99
5.6. Уравнение вместимости для судов с двойным бортом и десондом, несущих кубовый груз	105
5.7. Вместимость сухогрузных судов с кормовым и транзитным расположением машинного отделения. Эддерфогтауа. Об изменении вместимости при малых приращениях главных размерений	104
5.8. Вместимость танков судов	108
5.9. Определение вместимости в растопленном балластных цистерн. Удифференциальная грузовой судан в балластном порезде	114
5.10. Вместимость судна, определяемая по правилам обмера	110
6. ВЗАИМОСВЯЗЬ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОРМЫ СУДА. УЧЕТ КОЛЕБЛЕМОСТИ ВЕЛИЧИН	117
6.1. Связь между параметрами статистической формулы	117
6.2. Приложение метода наименьших квадратов и построение кривых средних значений	119
6.3. Определенные отклонения величин от их средних значений	121
6.4. Связь между коэффициентами полноты по Нортонау, Стрессону. Кривые средних значений	124
6.5. Определение коэффициента полноты мидель-планов судна	126
6.6. Определение коэффициента продольной остроиз	128
6.7. Определение коэффициента полноты концентральной (грузовой) остроиз	128
6.8. Связь между коэффициентом мидельплана, размерениями и коэффициентом полноты судна	130
6.9. Формулы Эйлера, Окупова и Нортона для η_c	131

4.10. Зависимость метацентрического радиуса от главных размерений и коэффициента полноты	128
7. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОСТОЙЧИВОСТИ И ПЛАВНОСТИ КАЧКИ СУДА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ	142
7.1. Проверка метацентрического момента как критерия устойчивости судна. Относительно метацентрического момента	142
7.2. Величие волнения на бортовом качку судна	144
7.3. Связь периода собственных поперечных колебаний судна с его размерениями и метацентрической высотой	147
7.4. Оценка плавности бортовой качки по максимальным угловым	152
7.5. Рекомендации по назначению волнения B и A , характеризующие начальную остойчивость судна	154
7.6. Приемы составления уравнений остойчивости. Уравнение остойчивости по K . Определение $\delta \eta$ и связь его с другими величинами	155
7.7. Уравнение остойчивости в дифференциальной форме. Изменение положения метацентра по высоте с изменением размерений и коэффициента полноты	161
7.8. Обеспечение остойчивости при больших углах крена	166
8. ЗАПАС ПЛАВУЧЕСТИ И ВЫСОТА НАДВОДНОГО БОРТА. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НЕПОТОПЛЯЕМОСТИ	170
8.1. Постановка задачи	170
8.2. Запас плавучести	170
8.3. Высота надводного борта по нормативам прочности судна	172
8.4. Высота надводный борт и стандартная водоизмещение судна. Соответствующий запас плавучести	173
8.5. Основные требования к балансу надводному борту. Поддержка запас плавучести. Стандартный и избыточный надводный борт	178
8.6. Надводный борт в весовой статистике судна	181
8.7. Обеспечение непотопляемости. Расстановка вербежек	184
9. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ХОДКОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ	194
9.1. Постановка задачи	194
9.2. Основы расчета потребной мощности энергетической установки	194
9.3. Определение мощности по формуле адмиралтейских коэффициентов	198
9.4. Определение мощности энергетической установки по двум основным формулам и функциям B и η	200
9.5. Анализ кривых мощности и сопротивления. Критическая скорость	204
9.6. Заключительная скорость. Запас мощности. Коэффициент использования скорости	206
9.7. Общие графические характеристики формы судна. Теоретический широк и среднее. Среднее по Шаттоуоту	206
9.8. О средней ширине судна. Строения по Валерману	209
9.9. Связь данных судна с мощностью. Относительная длина	213
9.10. Заостренность средней остроиз. Коэффициенты продольной остроиз и общей полноты	218
9.11. Положение центра тяжести по длине судна. Положение центра тяжести наибольшего сечения. Коэффициенты полноты остроиз	223
9.12. Заострение кормы	229
9.13. Форма носовой оконечности	232
10. ПОСТРОЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ЧЕРТЕЖА	237
10.1. Постановка задачи	237

10.2. Итерация вкроста	237
10.3. Предложенные способы проектирования стрелой по танталу и конструктивной впадинке	241
10.4. Построение теоретического чертежа по Н. А. Яковлеву и расчеты его способа	243
10.5. Власов-дальность. Шагивутт наибольшая величина	245
10.6. Алгоритм перестроения чертежа прототипа	246
10.7. Интерполяционный способ построения теоретического чертежа	248
10.8. Перестроение чертежа судна-прототипа на осевых стрелой по танталу вкроста	251
10.9. Построение судовой доверкости по одному лонжеронному выражению. Параболы метод	253
10.10. Лучевой метод Г. Е. Платонова	255
11. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ	258
11.1. Выводы в область применения научного аппарата теории проектирования судов. Использование научного аппарата других кораблестроительных дисциплин	258
11.2. Определение проектных характеристик судна	260
11.3. Оптимизация проекта. Метод совместных вариантов	267
11.4. Критерия оценки проекта	268
12. ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЕКТИРУЕМЫХ СУДОВ НА БАЗЕ МАТЕМАТИКО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МЕТОДОВ	272
12.1. О необходимости применения ЭВМ в математических методах проектирования кораблей	272
12.2. Методы оптимизации элементов судна	275
12.3. Перспективы развития методов оптимизации элементов судна	280
12.4. Оптимизация системы флота (первый этап)	285
12.5. Уточнение основных характеристик судов, укрупненных в задании на проектирование (второй этап работы оптимизации системы флота)	299
УКАЗАТЕЛЬ ЛИТЕРАТУРЫ	300
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	313

Автор Владимир Юрьевич Аким

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СУДОВ

Учебник. Наблюдать автор, переработанный в дополнения

Рецензенты:
Г. Е. ПЛАТОНОВ
Технический редактор
И. Е. ПЕЛЛИЧЕРО
Корректоры
Н. А. ЛЕРИНСКАЯ, П. В. ОСИПЕНКО, Е. П. СМЕРДИНОВА
Удостоверенный редактор
С. П. АНДРЕЕВ
Сборщики корректуры
Ю. В. ОСИПЕНКО

ИД № 89

Сдано в набор 15.04.85. Подписано в печать 24.05.85.
Издано в форме 80x80 см. Гарнитура шрифта литературный. Печать офсетная. Усл. печ. л. 99. Вкл. в пер. 99. Маш. и 80.3. Тираж 2000 экз. Заказ № 112.
Маш. № 207-84. Цена 3 р.

Издательство «Судостроение», 10305, Ленинград,
32, Грива, 5.

Допустимая информация № 4 судна Буренко
Красноярска Ленинградского областного Технического института им. Сергея Савицкого (технический институт им. Государственного института СССР на базе высшей школы, литературы и науки города)
31120, Ленинград, Савицкий переулок 24, 14.