

А.М.НОГИД

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОРСКИХ СУДОВ

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ
ПРОЕКТИРУЕМОГО СУДНА

*Допущено Министерством высшего и среднего
специального образования РСФСР
в качестве учебника для студентов
кораблестроительных вузов и факультетов.*

У 2644/19



ИЗДАТЕЛЬСТВО „СУДОСТРОЕНИЕ“

Ленинград 1984

Книга является первой частью курса проектирования морских судов. В ней рассматриваются основные задачи, возникающие при определении элементов проектируемого судна. Вопросы, связанные с рациональным выбором соотношений главных размерностей судна и эффективностью теоретического чертежа исходя из требований, предъявляемых к остойчивости, качке, непотопляемости и ходкости судна, будут рассмотрены во второй части курса. Книга рассчитана на студентов кораблестроительных вузов и предназначена в соответствии с программой курса проектирования судов как учебник по теории проектирования судов и пособие при разработке курсовых и дипломных проектов.

Одновременно книга предназначается для инженеров-кораблестроителей, работа которых связана с проектированием судов.

Предлагаемая вниманию читателей книга представляет собой первую часть курса проектирования морских судов. Она охватывает вопросы, относящиеся к методическому аппарату этой дисциплины.

Для того, чтобы правильно использовать методический аппарат, необходимо иметь четкое представление о требованиях, предъявляемых к показателям остойчивости, непотопляемости, качки и ходкости судна, и их зависимости от соотношений главных размерностей и коэффициентов, характеризующих форму судовой поверхности. Этим вопросам будет посвящена вторая часть курса.

В основу настоящей книги легли главы I—V, VII, IX и XIV курса «Теория проектирования судов», опубликованного автором в 1955 г. При переработке этой части курса добавлены расчетные графики и таблицы для определения весов, входящих в нагрузку судна, координат их центра тяжести и других величин.

Коренным образом на основе новых исследований автора переработано изложение вопросов определения вместимости судна в начальных стадиях разработки проекта и применения метода вариаций. Добавлены разделы, в которых рассматриваются балластировка грузовых судов в эксплуатационных условиях и особенности определения элементов лесовозов. Приведены новые многочисленные примеры определения элементов судна с использованием метода вариаций, показывающие, как постановка задачи и исходные расчетные предположения влияют на результаты.

По сравнению с опубликованным ранее значительно сокращена глава, в которой даются выкладки приближенных формул элементов плавучести и начальной остойчивости, и некоторые параграфы других глав. Ряд вопросов изложен в новой редакции.

Книга рассчитана на студентов кораблестроительных институтов как учебник по теории проектирования судов и пособие при разработке курсовых и дипломных проектов. Автор предполагает, что книга заинтересует также инженеров-кораблестроителей, работающих в области проектирования судов.

Автор приносит благодарность А. В. Броняшкому, редактировавшему рукопись, Н. В. Голубеву, просмотревшему некоторые ее разделы, и всем лицам, принявшим участие в обсуждении книги на заседаниях кафедры проектирования судов Ленинградского кораблестроительного института.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- $A = \frac{P}{S_{10}^{0.75}}$ — приведенная норма грузовой работы (кн/см²);
- B — ширина судна;
- B_0, B_n — относительная ширина судна по объему и весовому водонемещению;
- b — отношение соответственных поперечных размеров при аффинном преобразовании судна;
- C, C_1 — коэффициенты в аналитической формуле и формуле В. В. Давыдова;
- C_n — число Коши;
- D — весовое водонемещение судна;
- D_{100} — весовое водонемещение судна в аварийных условиях;
- D_0, D_n, D_a — водонемещение судна в балластном трюмке и при перевозке зерна и леса;
- d — диаметр якоря;
- E — модуль упругости;
- F — отношение модулей упругости;
- F_0, F_R — числа Фруда по длине и водонемещению, соответствующие эксплуатационной скорости;
- F_R — число Фруда по длине, соответствующее скорости на испытаниях;
- f — высота грузовых ящиков;
- G — эквивалентный весов (см. «Идентиксы»);
- g — ускорение силы тяжести;
- H — высота борта и предельная нецентральная высота;
- H_1 — приведенная высота борта;
- M_{TP} — глубина трюма;
- A — эквивалентная нецентральная высота;
- k_n — высота полена;
- A_n, h_n — высота яхтового дна и выстрелки;
- h_n — высота лесного груза на палубе;
- A_n — средняя осадочность;
- I, i — моменты инерции площади;
- I_n, I_p — поперечный и продольный моменты инерции площади ватерлинии;
- i — относительные моменты инерции;
- K — сила и касательные затраты;
- K_R, K_Q, K_n — безразмерные коэффициенты продольного момента инерции ватерлинии, продольного нецентральности радиуса и абсциссы центра тяжести.

k_1, k_2, k_3 — безразмерные коэффициенты поперечного момента инерции, осевого момента инерции, осевого момента инерции радиуса и центра волнения;
 k_4, k_5 — коэффициенты плотности податливого объема корпуса и объема машинного отделения;
 $k_6 = 1 - \frac{\sigma_a}{\sigma_{\text{пр}}}$ — коэффициент в уравнении жесткости;
 L — длина судна;
 I — отношение соответствующих продольных размеров;
 l — относительная длина судна по объему и весу, выходящему;
 l_1, l_2 — расстояния между палубой и остейностью формы;
 l_3, l_4 — длина трюма, машинного отделения, надстроек и палуб;
 l_5, l_6 — длина палубы;
 l_7, l_8 — длина частей судна, расположенных в нос и в корму от грузовых трюмов;
 N, N_p — моменты инерции нормализован и на экономическом ходу;
 $N_{\text{мг}}$ — момент инерции;
 n — число оборотов гребного вала;
 n_1, n_2 — число резов на протяжении авантажа и число пробегов в рейс;
 n — частота колебаний;
 n_1, n_2 — частота вертикальных и горизонтальных колебаний корпуса;
 n_1, n_2, n_3 — численность параскопов, коммента, старших и матросов;
 M — момент сил и мера сбалансированности;
 m — масса и возмещение метацентра над основной плоскостью;
 $m = \frac{P_1}{P}$ — относительный вес топлива;
 P — объемная сила, частая грузоподъемность судна, суммарная постоянная масса;
 P_1 — вес, входящий в нагрузку судна (см. «Индиксы»);
 P_2 — изверженная вес (см. «Индиксы»);
 Q — провозная способность;
 q — обремененность перевозкой груза;
 R — радиус шара, продольной метадатерической радиус;
 R_0 — число Рейнольдса;
 r_1, r_2 — радиусы авантажа и рейса при полной и экономической скорости;
 r_3 — длина пробегов в рейс;
 S — поверхность, площадь; в частности, площадь грузовой палубы;
 S_1, S_2, S_3 — годовые эксплуатационные расходы и их составляющие, равномерно распределенные на протяжении авантажа;
 S_4, S_5, S_6 — эксплуатационные расходы на протяжении ходового времени, грузовых операций и стоянок или грузовых операций;
 S_7, S_8, S_9 — составляющие суточных эксплуатационных расходов;
 s — средняя площадь броневого;
 T — осадка судна и промежуток времени;
 T_0 — осадка в балластном пробеге;
 T_1, T_2 — осадка в нос и в корму;
 T_3, T_4 — осадка судна с грузом леса и зерна.

t — период колебаний и промежуток, времени, продолжительность, время;
 t — отношение соответствующих вертикальных размеров при асимметричном преобразовании судна;
 t, t_0 — относительная осадка по объему и весу, выходящему;
 a — скорость судна, м/сек;
 d — диаметр усилителя;
 $a = \frac{2k}{L}$ — относительная координата;
 V — объемное водозащитное;
 v, v_1 — скорость судна ползая и экономическая, узл;
 v_2, v_3 — скорость на авантаже и эксплуатационном, узл;
 W — момент сопротивления и объем трюма;
 W_1 — полный объем судна;
 $W_{\text{мг}}$ — податливая жесткость;
 W_1, W_2, W_3 — буксировочная мощность в кг-м/сек, метрических л. с. и английских л. с.;
 W_4, W_5 — объем надстроек и рубок;
 x, x_1 — относительные абсциссы центра тяжести отдельных весов (см. «Индиксы»);
 x_2 — абсцисса центра волнения;
 y — координата центра тяжести судна;
 z, z_1 — возмещение центра волнения и центра тяжести судна над основной плоскостью;
 z_2 — возмещение над основной плоскостью центра тяжести отдельных весов (см. «Индиксы»);
 z_3 — возмещение центра волнения при изгибании судна над электромеханическим изгибанием судна;
 z_4 — коэффициент полноты грузовой палубы;
 z_5 — коэффициент полноты площади грузовой палубы в пределах трюма;
 β — коэффициент плотности воды авантажа;
 γ — угловой вес воды;
 γ_1 — коэффициент использования грузоподъемности;
 γ_2 — изгибание осадки;
 Δh — изгибание начальной метадатерической высоты;
 ϵ — коэффициент общей полноты;
 ϵ — отношение нейтральной оси корпуса от килля в долях высоты борта;
 ζ — коэффициент сопротивления;
 η — коэффициент utilization площади профиля;
 η_1, η_2 — коэффициенты utilization водозащиты по частям грузоподъемности и авантажу;
 η_3 — общий коэффициент приращенной водозащиты;
 η_4, η_5, η_6 — коэффициенты приращенной водозащиты по главным размерам и изгибанию водозащиты;
 η_7, η_8 — коэффициенты Нормала и частный коэффициент приращенной водозащиты по угловому весу второго трюма;
 η_9, η_{10} — коэффициент изгибания авантажа и суммарный (валовой) приращенный коэффициент;
 η, δ — угловые перемещения, скорости и ускорения;
 χ — отношение сил и коэффициент полноты площади палубы по авантажу в пределах грузовой трюма.

- λ — масштабный коэффициент, отношение отрезков длины;
- $\lambda = \frac{L_n}{L_n}$ — соотношение между длиной частей судна, рас-
положенными в нос и в корму от грузовой трюмы;
- ρ — коэффициент Пуассона, отношение масс, объема грузовой
работ, удельная вместимость трюма;
- $\rho_n = \frac{W_n}{P_n}$ — удельная приведенная вместимость трюма по лесному
грузу;
- ρ_n^* — удельная приведенная кубатура лаубного леса;
- $E = \frac{(E_n R)}{H}$ — относительные возмущения центра тяжести грузов
(см. «Индексы»);
- r — радиус, горизонтальный метаметрический радиус;
- α — изгибная, площадь грузовой заготовки в археологических
трюмах, площадь грузовой заготовки;
- α_0 — предель текучести;
- α_{01} — предель текучести алюминия и стали;
- α_{02} — отношение промежуточных трюмов, продолжительность
рейса;
- α_{03} α_{04} α_{05} — годовое время, продолжительность грузовой операции
в стоянке вне грузовой операции на протяжении рейса;
- α_0 — период колебаний свободных колебаний;
- α_0 — коэффициент продольной полноты;
- α_{01} α_{02} — коэффициент продольной полноты носовой и кормовой
эпюр судна;
- α_0 — коэффициент вертикальной полноты;
- α_0 — угол дифференциала;
- α_0 — площадь, площадь;
- α_0 α_{01} α_{02} — объем грузовой заготовки, двойного дна, толщинной эк-
сперимента;
- α_0 — суммарный объем заготовки и коридора гребного вала;

Индексы буквенных обозначений: α_0 , α_{01} , α_{02} , α_{03} , α_{04} , α_{05} — индекс i обозначается

одним из указанных ниже индексов.

- α_0 — балласт;
- α_0 — вооружение и боезапас;
- α_0 — груз;
- α_0 — лесной;
- α_0 — залив, водоналивная, груз;
- α_0 — жерма;
- α_0 — корпус;
- α_0 — лесной груз;
- α_0 — механизмы;

- α_0 — надстройка;
- α_0 — оборудование;
- α_0 — судно, порожнее;
- α_0 — рубка;
- α_0 — снабжение;
- α_0 — сталь;
- α_0 — толщина;
- α_0 — суммарный вес леса и балласта;

Глава первая

ПРЕДМЕТ ТЕОРИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДОВ, ЕЕ ЗАДАЧИ И НАУЧНЫЙ МЕТОД

Курс проектирования судов может быть изложен
как путем дедуктивным, или путем индуктивным.
Первый метод, наиболее распространенный, за-
ключается в себе след: эмпирически формулы, правила,
основанные и пр., принимаемые как догматы, без
исследования и критики, под прикритиком лишь авто-
рита из автора...

...Второй метод изучения проектирования судов...
состоит в том, что после исследования и оценки усло-
вий, представляемых как на самом судне, так и в ка-
ждой отдельной части его, путем математического
анализа находят размеры судового корпуса и всех
частей его, отыскивая лишь на точные законы физики
и механики, а также и на результаты опыта (а не
обычно)... Вслед критике, анализ и опыт заменя-
ют формулы, метод этот дает и совершен-
ствует технику, не позволяя ей углубляться в отдельные
формы, как никогда было с техникой древнего
судостроения: он заставляет каждого чертить
в свое умение и искусство, а не в формулы на со-
вершенно чуждого.

И. Г. Вульфов.

§ 1. ПРЕДМЕТ ТЕОРИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДОВ

Теория проектирования судов разрабатывает круг вопросов,
связанных с определением элементов проектируемого судна. Это
положение следует понимать в самом широком смысле, так как для
обоснованного выбора элементов судна необходимо одновременно
установить его архитектурный тип, разнести основные отсеки,
проработать схемы бронирования и противоминной защиты, распо-
ложить различного рода устройства, рассмотреть другие узловые
вопросы, возникающие при проектировании нового судна. С другой
стороны, предлагаемая формулировка относится ко всем этапам
определения элементов проектируемого судна, начиная с первых
приближений и кончая моментом, когда размеры судна и его форма
окончательно зафиксированы после всех необходимых проверочных
расчетов и исследований.

Важность рассматриваемой задачи становится очевидной, если
принять во внимание, что после фиксации тех предположений,
которые легли в основу проекта, от выбранных соотношений элемен-
тов и показателей формы судна зависят также его основные свойства,
как остойчивость, живучесть, поведение на использованном море,
экономичность и т. п. В рамках установленных заданием, совокуп-

ность этих свойств уже в значительной мере определяет эксплуатационную целесообразность гражданского судна и боевые качества военного корабля. Поэтому с принципиальной точки зрения после определения элементов судна вся остальная, очень сложная и трудоемкая творческая работа по проекту является детализацией принятых ранее решений, которая основана уже не на теории проектирования судов, а на теории корабля, строительной механике корабля, технологии судостроения и судового машиностроения и т. п.

Несмотря на разнообразие приемов, которые употребляются при определении элементов проектируемого судна, с математической точки зрения все они, в конечном счете, сводятся к составлению системы уравнений, связывающих заданные и частично выбранные тактико-технические показатели с главными размерениями судна и коэффициентами, определяющими его форму.

В качестве примера можно привести уравнение весов, выражающее одно из условий статического равновесия судна, согласно которому его водоизмещение равно сумме всех весов, действующих и нагрузку. Для того чтобы использовать это уравнение, необходимо выразить отдельные веса через заданные величины и элементы судна. В частности, например, учете о сопротивлении воды движению судов позволяет связать функциональными зависимостями мощность и вес механизма со скоростью хода, относительной длиной, коэффициентом продольной полноты, отношением ширины судна к осадке и водоизмещением. Вес топлива можно выразить через те же величины и, кроме того, — через удельный расход топлива, дальность плавания и т. п. Аналогично можно составить уравнение остойчивости, связывающее показатели остойчивости с элементами судна, или уравнение надводного борта, вместимости и другие.

Подобные уравнения, применяющиеся в различных формах и сочетаниях, служат основой многочисленных приемов, известных себе место при определении элементов проектируемого судна. В своей совокупности они образуют так называемую методику проектирования судов¹, которая является составной частью рассматриваемой дисциплины.

Методически рациональный подход к определению элементов проектируемого судна сам по себе еще не гарантирует получения валидных результатов. Действительно, качественные показатели спроектированного судна в значительной мере зависят от общих идей, заложенных в проект, и от решений, принятых при рассмотрении частных вопросов, возникающих в процессе разработки проекта.

Для иллюстрации этого положения остановимся на упомянутом выше уравнении остойчивости. Это уравнение можно использовать при различных значениях фигурирующей в нем метacentрической высоты. Независимо от этого можно ввести в уравнение остойчивости

вместо метacentрической высоты другие связанные с ней параметры, например период свободных поперечных колебаний или угол крена на циркуляции, придавая им ряд частных значений. Таким образом, используя уравнение остойчивости совместно с уравнением весов, мы можем задать бесконечное количество частных решений задачи. Соответствующие им варианты судна будут удовлетворять требованиям, предъявленным в задании к грузоподъемности, скорости хода, дальности плавания и пр., отличаясь одновременно мореходными качествами, экономичностью и т. п.

Для того чтобы выбрать наилучшие практические осуществимые решения, нужно, очевидно, исследовать качественные показатели вариантов судна. Подобную работу в отношении, например, мореходных качеств можно выполнять, если для судна данного типа известны пределы остойчивости, необходимой для обеспечения безопасности плавания и в то же время допустимых с точки зрения поведения судна на волновальном море. Кроме того, решая подобную задачу, проектировщик должен иметь достаточно четкие представления о влиянии соотношений элементов и других показателей формы судна на его мореходные и эксплуатационные качества.

Из сказанного следует, что теория проектирования судов не может ограничиться одним лишь совершенствованием методических приемов, а должна разрабатывать по существу также и другие вопросы, связанные с определением элементов проектируемого судна, во не являющиеся отражениями в используемых уравнениях.

Этот путь позволяет создать базу, необходимую для успешного применения методического аппарата, присущего теории проектирования судов, как это подробнее изложено ниже.

Методы теории проектирования судов применимы к судам и кораблям любого типа и класса. Однако в пределах каждого типа и класса есть свои специфические условия, определяющие ту или иную постановку задачи. В соответствии с этим и методика определения элементов судна в ее конкретной интерпретации может претерпевать значительные изменения. То же самое можно сказать и о других задачах, отмеченных выше. Поэтому теория проектирования судов не может охватить все возможные на практике случаи и прижизненно ограничиться рассмотрением вопросов, имеющих более или менее общее значение. Это дает основание излагать специфические вопросы, касающиеся проектирования отдельных типов судов, в специальных трудах.

Заканчивая на этом общую характеристику предмета теории проектирования судов, отметим, что аналитические способы определения элементов судна пришли на смену эмпирическим правилам, которыми судостроители руководствовались при проектировании судов вплоть до начала XIX века. Наиболее полно такие эмпирические приемы были разработаны в сочинениях шведского адмирала Чалмаера, опубликованных во второй половине XVIII века.

¹ Здесь и в дальнейшем под методикой проектирования судов понимается методика определения их элементов.

В тридцатых годах прошлого столетия М. М. Окунов предложил пользоваться при определении элементов проектируемого судна зависимостями, которые, конечно, являлись первыми пробами уравнивания веса и уравнивания остойчивости, используемых в настоящее время. Зависимости М. М. Окунова отражали специфику парусного флота. Во второй половине XIX века аналогичные уравнивания, предназначенные для определения элементов паровых судов, были предложены французским инженером Норманом.

Курс проектирования судов, опубликованный К. П. Боклевским в 1904 г. [7], явился первой попыткой обобщения знаний, накопленных в рассматриваемой области на протяжении XIX века, и сыграл большую роль как удачный опыт построения теории проектирования судов в акде отдельной научной дисциплины¹.

В дальнейшем широкую трактовку вопросов теории проектирования судов стала традицией русских судостроителей, которая нашла отражение в трудах В. Л. Попова [37], А. И. Балканина [3], В. А. Липина [21] и в курсе автора [28]. Из иностранных сочинений по проектированию судов можно назвать книги Холларда [58], Маннинга [23] и коллективный труд Аркебуорта Шокера, Повербурга и Вессака [1]. Часто эти вопросы освещаются в известной мере также в общих курсах корабельной архитектуры и теории корабля. Такой характер имеют книги Ариотта [2] и Гернера и Ферловска [57].

Вопросы проектирования судов нашли отражение в ряде справочных изданий. К их числу относятся «Справочник по судостроению» [47] и немецкие справочники [50] и [66] (последний вышел в ряде изданий, отличавшихся друг от друга по содержанию).

Исследования, опубликованные по отдельным вопросам проектирования судов, отмечены в последующих главах настоящей книги.

С историей развития учения о проектировании судов можно ознакомиться более подробно по работам [12] и [27].

§ 2. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОЕКТИРУЕМОГО СУДА

При изложении вопросов, затронутых в настоящем параграфе, авторы различных сочинений пользуются неодинаковой терминологией. В этой связи следует отметить, что под методом понимают либо частный прием исследования, либо общее направление, принятое при изучении вопроса. В этом последнем смысле и понимается

метод в настоящей книге². С этой точки зрения многочасовые приемы, используемые при определении элементов проектируемого судна, можно объединить в более общие методы, определяющие постановку и решение задачи в целом. В их числе, в первую очередь, следует назвать метод последовательных приближений, которым складывается неизбежно пользоваться, поскольку далеко не все требования, предъявляемые к судну, удастся выразить конкретными аналитическими зависимостями. Возникающие вследствие этого затруднения частично устраняются, если в уравнения, используемые при определении элементов судна, наряду с аналитическими зависимостями вводят также зависимости, выраженные в графической или табличной форме. Так, например, для того чтобы свести вес механизмов или вес топлива с элементами судна, можно воспользоваться какими-либо графиками, предложенными для определения мощности механизмов. Аналогично можно использовать таблицы надводного борта гражданских судов или материалы, подготовленные заранее расчетным путем. Но и при такой более широкой трактовке вопроса число исковых неизвестных в большинстве случаев превосходит число уравнений, которые можно составить при определении элементов проектируемого судна.

Отмеченное обстоятельство является характерной особенностью задачи, вследствие которой ряд требований, предъявляемых к судну, не находит обычно отражения в сформулированных для ее решения условиях. Поэтому для оценки полученного решения приходится, как правило, прибегать к проверочным расчетам, которые удобно распределить по нескольким этапам или приближениям. Результаты, полученные в каждом последующем приближении, используются для корректировки элементов судна, найденных в предыдущих приближениях, и для уточнения принятых при этом допущений.

Принцип последовательных приближений находит свое выражение и в развитии процесса проектирования на отдельные стадии. К их числу относятся: разработка оперативных или эксплуатационных заданий, претворения проработки проекта, составление технических заданий, разработка эскизного проекта, технического проекта и рабочих чертежей.

В каждом конкретном случае рабочая схема метода последовательных приближений может изменяться в зависимости от специфики задачи и индивидуальных навыков проектировщика. Это относится к распределению работ по этапам и к частным приемам, используемым в каждом этапе.

Второй характерная особенность задачи определения элементов

¹ В двадцатых годах К. П. Боклевский коренным образом переработал свой курс. Подготовленная им в печаль духотала не была опубликована. Один экземпляр ее хранится в библиотеке Ленинградского кораблестроительного института.

² В том же смысле понимает метод И. П. Павлов, когда он говорит: «Метод изучения системы человека тот же, что и всякой другой системы: разделение на части, изучение своих частей, изучение соотношений с окружающей природой и в конце концов познание на основании всего этого ее общей работы и управления ею, если это в средствах человека» (И. П. Павлов, Избранные сочинения).

проектируемого судна заключается в том, что в уравненных теориях проектирования судна, наряду с исходными элементами судна и заданными величинами, какими являются скорость хода, дальность плавания, грузоподъемность и т. п., фигурируют произвольные параметры. Под произвольными параметрами понимаются величины, численное значение которых в известных пределах устанавливается по усмотрению проектировщика. Примером произвольного параметра может служить метастатическая высота, численное значение которой или вовсе не оговаривается в заданиях или же в той или другой форме оговариваются ее пределы. Исходя из тех же соображений к числу произвольных параметров можно отнести период собственных поперечных колебаний судна, показатели его непотопляемости и т. п.

Присутствие в исходных уравнениях произвольных параметров делает задачу определения элементов проектируемого судна неоднозначной. Поэтому, как это уже отмечалось, требованиями, сформулированными в заданиях, можно удовлетворять различными путями. В возможных вариантах решения задачи суда будут отличаться как главными размерениями и коэффициентами теоретического чертежа, так и водоизмещением и мощностью механизмов. При этом, как правило, изменение одного из элементов судна, комбинированное таким образом, чтобы требования задания не были нарушены, улучшает одни качества судна и ухудшает другие.

Так, например, увеличение отношения ширины судна к его осадке приводит к увеличению начальной остойчивости, что в большинстве случаев благоприятно сказывается на безопасности плавания. Однако с возрастанием начальной остойчивости ухудшается поведение судна на волнообразном море, что снижает эффективность использования судна и при некоторых условиях может привести даже к снижению безопасности плавания. Эти обстоятельства приводят к необходимости ограничить верхний предел начальной метастатической высоты.

Увеличение отношения высоты борта к осадке улучшает показатели непотопляемости и остойчивости судна на больших углах крена, а также снижает его заливаемость. С другой стороны, увеличение отношения высоты борта к осадке приводит во многих случаях к возрастанию водоизмещения судна и его габаритов. Независимо от этого повышается его центр тяжести, что неблагоприятно со многих точек зрения. Для военных кораблей увеличение площади силуэта вследствие возрастания высоты надводного борта нежелательно также с точки зрения их уязвимости.

Вследствие такой неопределенности задачи возникает необходимость выделить из бесчисленных возможных сочетаний элементов судна сочетание, соответствующее наиболее благоприятному решению. Эта задача решается методом вариаций, который сводится к определению элементов судна в ряде вариантов, удовлетворяющих основным требованиям задания, и к анализу полученных решений.

При выборе той или иной комбинации элементов учитываются качественные показатели вариантов судна, например аэродинамические, габаритные размеры, мощность машинной установки, степень экономичности, мореходные и эксплуатационные качества и т. п.¹

Как и метод последовательных приближений, метод вариаций определяет лишь общий подход к решению задачи. В каждом частном случае его можно конкретизировать в виде одного из частных приемов, предложенных для анализа влияния изменения элементов судна на его качества.

Метод последовательных приближений и метод вариаций не исключают, а скорее дополняют друг друга. Действительно, метод вариаций можно применять на заключительных этапах решения задачи методом последовательных приближений. С другой стороны, применение метода вариаций возможно лишь после предварительной проработки вопроса более простыми средствами, приносящими методу последовательных приближений. Поэтому при рассмотрении вопроса с практической точки зрения различия обоих методов в значительной мере сглаживаются, а метод вариаций можно классифицировать как частный прием, который укладывается в схему метода последовательных приближений. Все же целесообразнее считать их независимыми приемами, поскольку они отражают два различных принципа построения научного метода: метод последовательных приближений ведет нас от частного к общему, в то время как в методе вариаций частное решение получается из общего.

В пользу такого деления говорят и то, что сопоставляемые методы несколько отличаются и по своему назначению. Действительно, как это было показано выше, метод последовательных приближений является наиболее общим методом, поскольку им приходится неизбежно пользоваться при определении элементов проектируемого судна. Метод же вариаций предназначен в первую очередь для исследований в области проектирования, которые могут выполняться как в общем плане, так и применительно к отдельным проектам. Чем лучше будут изучены общие закономерности, обуславливающие в типичных случаях практики целесообразность того или другого решения, тем обоснованнее можно будет определять элементы проектируемого судна, не прибегая каждый раз к специальным исследованиям.

¹ В некоторых случаях определение наиболее благоприятных решений сводится к нахождению экстремальных значений функций, например минимального водоизмещения, минималькой себестоимости верфики груза, максимальной скорости хода. Ча то, однако, приходится сопоставлять варианты, относящиеся к различным категориям, например остойчивость в лавку, что значительно осложняет задачу. Подробно этот вопрос рассмотрен в главе девятой.

В предыдущем параграфе вопрос об определении элементов проектируемого судна был охарактеризован методически. Методика проектирования судов разработана в настоящее время относительно полно, однако, указывая общие пути решения рассматриваемой задачи, она не охватывает всех связанных с этим вопросов. В частности, например, используя современный методический аппарат, можно спроектировать судно так, что оно будет обладать некоторыми качественными показателями, сочетание которых мы рассматриваем как оптимальное. Эта задача не лишена, однако, элементов условности, так как в настоящее время еще не всегда ясно, что следует понимать под таким оптимальным сочетанием качеств судна. Разработка этого вопроса является одной из первоочередных задач теории проектирования судов.

В основных уравнениях теории проектирования судов не находят также отражения вопросы, связанные с выбором рационального типа машинной установки, числа гребных валов или типа судовых вспомогательных механизмов. То же самое можно сказать о числе, расположении и оборудовании грузовых трюмов на транспортных судах или расположении вооружения на военных кораблях.

В большинстве случаев подобные вопросы можно исследовать методом вариаций, роль которого при выборе элементов проектируемого судна была уже охарактеризована выше. К сожалению, такой анализ, связанный с составлением значительного количества вариантов, отличается большой громоздкостью. Вследствие этого проектировщик, стремящийся вполне обоснованно решать вопросы, возникающие в процессе разработки проекта, часто из-за недостатка времени отказывается от рассмотрения таких вопросов. Этим определяется необходимость рассмотрения таких вопросов в общем плане в теории проектирования судов.

Сказанное в известной мере можно отнести и к выбору соотношений элементов проектируемого судна. Поясним это следующим примером.

В процессе проектирования грузовых судов коэффициент общей полноты, по крайней мере в первом приближении, определяется по одной из многочисленных эмпирических формул, выражающих эту величину через относительную скорость хода. Большинство этих формул построено путем анализа крайних сопротивлений, основанного на предположении, что при данном коэффициенте общей полноты эксплуатация судов при скоростях, превышающих критическое значение (после которого сопротивление начинает быстро возрастать), — экономически невыгодна.

Оценивая такие формулы, нужно иметь в виду, что себестоимость перевозки грузов складывается из расходов, связанных с одной стороны, с эксплуатацией корпуса судна и судового оборудования,

а с другой, — с эксплуатацией машинной установки. Поэтому нет оснований заранее предполагать, что экономически выгодное значение коэффициента общей полноты определяется лишь одной относительной скоростью хода и не зависит от размеров судна, дальности и района плавания, типа машинной установки.

Применяя метод вариаций при исследовании рассматриваемой задачи, можно было бы, вероятно, найти такие же общие, но более обоснованные зависимости, определяющие оптимальное значение коэффициента общей полноты судов различных типов и размеров. Это значительно облегчило бы труд проектировщиков и помогло бы улучшить качество проектов.

К теории проектирования судов следовало бы отнести также задачи нормативного характера, как например нормирование нижнего и верхнего предела остойчивости судов и неповторяющимся состоянием, нормирование непотопляемости и аварийной остойчивости и т. п. Такие задачи, связанные в известной мере с вопросом об оптимальных качествах судна, нельзя решать лишь средствами одной теории корабля без учета влияния, которое оказывает то или иное решение на судно в целом.

Не задаваясь целью перечислить все вопросы, которые разрабатываются или должны разрабатываться в теории проектирования судов, заметим, что она соприкасается с другими судостроительными дисциплинами, но сохраняет при этом присущий ей научный метод. Это можно показать на примере теории корабля.

Теория корабля решает прямую задачу о мореходных качествах судна заданных размеров и формы. Теория проектирования судов решает обратную комплексную задачу о размерах и форме судна, соответствующих заданным качествам. Различная постановка задачи в этих дисциплинах может привести к принципиально различным решениям.

Так, например, из учета о сопротивлении воды движению судна можно вывести заключение, что в каком-либо конкретном случае заданному водоизмещению и скорости хода соответствует определенное оптимальное значение длины, обеспечивающее минимальное сопротивление. Такой анализ приводит большей частью к цифрам, не согласующимся с современной практикой строительства судов. При рассмотрении аналогичной задачи в плане теории проектирования судов необходимо учесть, что увеличение длины судна, выходящее в известных пределах для уменьшения сопротивления воды, а следовательно, мощности и веса механизмов, сопровождается возрастанием относительного веса корпуса. При известных условиях оно может привести к увеличению водоизмещения, которое будет сказываться неблагоприятно на мощности механизмов. Таким образом, учет весовых соотношений переносит вопрос в совершенно другую плоскость, так как задача решается при переменном водоизмещении.

При более углубленной проработке вопроса дополнительные

данные. Для решения задачи можно получить путем исследования влияния изменения размеров корпуса и мощности механизмов на стоимость судна. Если речь идет о проектировании гражданского судна, эти данные можно использовать для рассмотрения вопроса об экономической целесообразности того или другого решения. При проектировании военного корабля будут, очевидно, учтены преимущества корабля малого водоизмещения с небольшими габаритными размерами.

Соображения о ходовых качествах судна, приведенные выше, можно отнести и к другим его качественным показателям, например показателям остойчивости или живучести. Исследуя их в плане теории проектирования судов, следует рассматривать водоизмещение как переменную величину, что также переводит задачу в новую область. Новая же постановка задачи требует новых средств для ее исследования. Сказанным объясняется различия в научном методе обеих дисциплин.

Не останавливаясь более на деталях, отметим, что со строительной механикой корабля теория проектирования судов знает меньше точек соприкосновения. Основным смежным вопросом является вопрос о влиянии элементов судна на вес корпуса. Этот весьма важный вопрос еще недостаточно разработан, вследствие чего приходится пока базироваться в основном не на теоретических, а на эмпирических, притом весьма приближенных зависимостях. Приближенные формулы выбора судов могут быть непосредственно использованы в начальной стадии проектирования при оценке, например, приемлемости намеченных к установке двигателей.

Корпусная архитектура до настоящего времени не получила заметного отражения в теории проектирования судов, хотя вопросы, связанные с выбором архитектурного типа гражданского судна, и некоторые более специальные вопросы являются смежными для обеих дисциплин.

Технология постройки судов, которой уделяется большое внимание при разработке военных и технических проектов, в начальной стадии проектирования не находит заметного отражения. Некоторые основные положения, например объем сварки, должны быть все же учтены уже при определении элементов судна, поскольку они отражаются на соотношениях, характеризующих вес корпуса и положение его центра тяжести. С технологией постройки судна приходится также считаться при проектировании формы судовой поверхности.

В процессе определения элементов судна необходимо выбрать тип машинной установки и основные характеристики машинного оборудования. Этим вопросам уделяется большое внимание при определении элементов проектируемого судна, так как машинная установка оказывает существенное влияние на качественные показатели судна в целом. Более специальные вопросы, относящиеся к проектированию машинной установки, рассматриваются в теории

проектирования судов лишь в той мере, в какой это необходимо для выполнения зависимостей, определяющих веса механизмов, топлива, масла и запитываемой воды, а также для предварительного определения габаритов машинных и котельных отделений.

Методы экономики судостроения и эксплуатации судов используются в сравнительных подсчетах стоимости судов и себестоимости перевозок, выполняемых для сопоставления рассматриваемых вариантов решения задачи. Экономический анализ служит основой при исследовании многих вопросов, возникающих в процессе разработки проекта.

§ 4. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОТОТИПОВ. ГРАФИЧЕСКАЯ ПРОРАБОТКА ЗАДАЧИ

В процессе разработки проекта широкое применение находят всевозможные статистические зависимости. К их числу относятся статистические данные о соотношениях элементов, основных показателей и различного рода практических коэффициентах по отдельным типам судов, используемые при определении элементов проектируемого судна.

Обычно при обработке такого рода материалов за основу берут обобщенные данные по судам того или иного типа, по которым можно выявить различные изучаемые единицы. Поэтому остаются непонятными причины наблюдающихся значительных отклонений от средних статистических закономерностей, что затрудняет использование полученных результатов.

Более ценные результаты можно получить, если при обработке статистических данных ставится задача выявить и объяснить многообразие возможных решений, чтобы дать конструктору руководящую нить для разумного, а не случайного подхода к изучаемому вопросу. Для этого, однако, нужно оперировать не обобщенным исходным материалом, а изучить реальные суда со всеми их индивидуальными особенностями. На практике это приводит к необходимости сузить область исследования и ограничиться сопоставлением небольшого числа однотипных судов.

В конечном счете стремление отказаться от обобщенной базы общих статистических зависимостей и опереться на реальные суда приводит к проектированию по прототипу.

Проектирование с использованием в той или другой мере подлинных прототипов является обычным способом разработки проектов. Обладая подробными проектными материалами по судам, используемым в качестве прототипов, можно составить себе представление об их достоинствах и недостатках и заметить правильные пути решения вновь поставленной задачи. С другой стороны, наличие хорошо изученных прототипов имеет существенное значение и для определения численных значений различных измерителей

и практических коэффициентов, которые применяются в рассматриваемой дисциплине. Действительно, только имея подходящие прототипы, можно надежно откорректировать исходные цифры такого рода, учитывая особенности проектируемого судна по сравнению с прототипами.

В тех случаях, когда нельзя подобрать подходящих прототипов, нередко приходится разрабатывать промежуточный проект для вывода соответствующих измерителей, или, иначе говоря, проектировать прототипы.

Суда-прототипы можно использовать и для решения отдельных частных задач, например при проектировании теоретического чертежа путем закономерных изменений обводов спроектированного ранее судна или для пересчета некоторых показателей проектируемого судна по прототипу. Необязательно проектируемое судно должно быть идентично с прототипом по всем его элементам. Так, например, при проектировании теоретического чертежа можно использовать один прототип, при назначении измерителей и составлении нагрузки — другой и т. п.

Понятие проектирование по прототипу трактуется иногда в том смысле, что каждый новый проект является дальнейшим развитием технических идей, заложенных в построенные ранее суда. По этому поводу следует отметить, что для правильного решения новых задач необходимо опираться на апробированный опыт, учитывая как положительные, так и отрицательные качества построенных судов. Этим, однако, нельзя ограничиться, поскольку в каждом новом проекте приходится решать новые задачи, обуславливаемые вновь возникающими потребностями народного хозяйства и государственной обороны. Внедрение технических и научных достижений в судостроение также приводит к необходимости искать новые пути решения задач, причем с ускорением темпов технического прогресса значение старых законов все более и более ограничивается.

В заключение полезно отметить, что исследование некоторых вопросов, связанных с определением элементов проектируемого судна, требует не только аналитической, но и графической проработки — вычерчивания в различных вариантах схематических эскизов общего расположения, эскизов теоретического чертежа и эскизов различных узлов. В начальной стадии проектирования графические работы позволяют выявить и обосновать архитектурный тип судна, установить принципы общего расположения и определить лимитирующие факторы, например те или иные максимальные габаритные размеры, обуславливающие возможность целесообразной компоновки судна. Схематические эскизы общего расположения и теоретического чертежа необходимы также для предварительных расчетов унифицировки, положения центра тяжести судна по высоте, кубитуры отсеков и для окончательного фиксирования коэффициентов, определяющих форму судна.

Объем графических работ и их чередование с расчетами обуславливается спецификой проекта, в частности степенью сложности поставленной задачи. Существенное значение имеет и характер проекта — его большая или меньшая насыщенность исследовательскими элементами. Принятая схема может в небольшой степени отразить и личные навыки проектировщика.

С вопросом о порядке развертывания графических работ в начальной стадии проектирования тесно связан вопрос о рациональной компоновке проекта, имеющей большое практическое значение. Необходимо, чтобы в теории проектирования судов нашло достаточно полное отражение исследование, связанные, например, с размещением устройств и приборов на открытых палубах и мостиках, компоновкой жилых и служебных помещений, распределением пассажирских потоков при приеме пассажиров на судно и при спускании их в места общего пользования или места посадки на шлюпки и т. п. То же относится к выбору типа и конфигурации надстроек, выбору схемы бронирования и ряду других вопросов, получающих отражение на чертежах общего расположения и разного рода схемах.

ПЕРЕСЧЕТЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СУДА НА ПО ПРОТОТИПУ ПРИ ПОЛНОМ И УСЛОВНОМ ПОДОБИИ СОПОСТАВЛЯЕМЫХ СУДОВ

§ 1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Как уже отмечалось, в процессе разработки проекта часто возникает необходимость сопоставлять ряд вариантов решения той или иной задачи. В подобных случаях целесообразно рассматривать судно, соответствующее основному варианту, как судно-прототип. В качестве прототипов могут быть также использованы ранее спроектированные или построенные суда.

При известных условиях многие тактико-технические показатели судна, соответствующие сопоставляемым вариантам, могут быть получены путем простейших пересчетов по судно-прототипу, что значительно упрощает решение ряда задач в начальной стадии проектирования. Формулы пересчета с судна-прототипа на проектируемое судно интересны также и потому, что они дают некоторое представление о влиянии изменения главных размеров судна на его тактико-технические показатели и, следовательно, заранее ориентируют проектировщика, в каком направлении следует развивать проект.

Задачи, возникающие при пересчетах по прототипу, могут быть разбиты на два класса. К первому классу относятся задачи, которые решаются в предположении, что сопоставляемые суда подобны. Задачи второго класса основываются на предположении, что форма нового судна получается из формы судна-прототипа путем вынесения в нее закономерных изменений. В подобных случаях можно говорить лишь об условном подобии сопоставляемых судов¹.

В дальнейшем при изложении задач второго класса рассматривается лишь так называемое аффинное преобразование обводов, осуществляемое путем независимого изменения масштабов судна-прототипа по длине, ширине и высоте. Практически это сводится к изменению расстояний между шпангоутами,ATERIAМИ И БИТОКАМИ.

¹ В курсе [28] такое подобие было названо «матричным».

С принципиальной точки зрения при решении задач первого класса могут быть полностью использованы способы пересчета на натуру данных, полученных в модельном эксперименте, базирующиеся на теории механического подобия и связанной с ней теории размерностей. В отличие, однако, от модельного эксперимента, требующего относительно точных способов пересчета установленных закономерностей на натуру, проектировщик, базируясь на теории подобия, может в большинстве случаев использовать ее лишь для приближенных выводов. Это дает основание при пересчетах с корабля на корабль ограничиваться менее строгими требованиями при установлении критериев подобия. Основания для нестрогой догадки, следует учесть, что обычно размеры сопоставляемых судов мало отличаются друг от друга. Поэтому метеоности исходных предположений при пересчете с судна на судно приводят к меньшей погрешности, чем при пересчете с модели на судно.

В качестве примера можно отметить, что это обстоятельство позволяет применять критерий Фруда при пересчете по прототипу полного сопротивления воды движению судна. В модельном же эксперименте эти критерии применяются лишь при пересчетах сопротивления.

В дальнейшем изложении при рассмотрении вопроса о пересчетах по прототипу в случае полного подобия сопоставляемых судов предполагается, что читатель имеет общее представление о теории подобия и размерностей. Лишь, желая ознакомиться с вопросом в более полном объеме, выйдут интересующие их сведения в трудах [16], [20], [29], [41] и др.

С простейшими правилами и начальными остойчивости при условном подобии сопоставляемых судов, а также с некоторыми другими простейшими пересчетами судостроители были знакомы уже на заре развития теории корабля. Способы пересчета остойчивости на больших углах крена были разработаны М. А. Белонизовским [4] и В. В. Семеновым-Тынь-Шанским [43]. Некоторые новые разработки, позволяющие расширить область пересчетов при условном подобии сопоставляемых судов, были включены автором в курс [28].

§ 2. ПЕРЕСЧЕТЫ ПО ПРОТОТИПУ ПРИ ПОЛНОМ ПОДОБИИ СОПОСТАВЛЯЕМЫХ СУДОВ

В подобного рода пересчетах некоторые величины определяются непосредственно исходя из геометрических соотношений. Для этой цели могут быть использованы формулы, приведенные в табл. 1, в которой буквой k обозначен линейный масштаб, а индексом нуль отмечены величины, относящиеся к прототипу. Формулы вытекают из размерности сопоставляемых величин.

Табл. 1 может быть использована для пересчета элементов плавучести судна и параметров, характеризующих его остойчивость, жесткость и герметичность. Так, например, метациентрическая

высота и восстанавливающие моменты при выходе от прототипа к проектируемому судну изменятся пропорционально линейному масштабу, а восстанавливающие моменты — пропорционально линейному масштабу, возведенному в четвертую степень.

Углы крена и дифферента при затоплении отсеков останутся неизменными, так как соотношения между силами веса и силами поддержания, а также между моментами этих сил не изменятся в зависимости от масштаба. Линейный же крен и дифферент изменятся пропорционально линейному масштабу.

При пересчете плавных соотношений формулы в табл. 1, выражающие объемные силы и их моменты, действительны только в случае, когда материалы, использованные при постройке, одинаковы для обоих судов.

Применение этих формул при пересчете сил и моментов, возникающих при постановке судна на волну, возможно при подобии волновых профилей. Однако эти формулы не могут быть использованы для моделирования явлений прочности в целом.

Действительно, сопоставляя выражения для изгибающих моментов и моментов сопротивления (или выражения сил и плечей), мы приходим к выводу, что для двух геометрически подобных систем напряжения связаны соотношением $\sigma = \sigma_0 \lambda$. Между тем, в подобных системах при одинаковом материале конструкций напряжения должны повиноваться условию $\sigma = \sigma_0$.

Для сохранения постоянного значения σ следовало бы так сконструировать новое судно, чтобы моменты сопротивления одноименных сечений возрастали пропорционально линейному масштабу, возведенному в четвертую степень. Допустим, что, сохраняя геометрическое подобие судов лишь в отношении формы, мы переконструировали бы соответствующим образом набор корпуса. Тогда нарушились бы весовые соотношения, а с ними и соотношения между

¹ Это более или менее очевидное положение может быть обосновано соображениями, вытекающими из теории размерностей. Действительно, при одинаковом материале конструкций модуль упругости в подобных системах будет одинаковым. Следовательно, одинаковым должны быть и напряжения, поскольку они имеют ту же размерность, что и модуль упругости.

действующими силами. Поэтому мы потеряли бы всякую возможность базироваться на теории подобия.

При моделировании динамических явлений, которые изучаются в курсах теории корабля или относятся к области прочности судов, используются главным образом критерии подобия Фруда, Рейнольдса и Коши. Критерий Фруда Fr применяется в тех случаях, когда во действующих сил основное значение имеют объемные силы. Критерием Рейнольдса Re пользуются при изучении явлений, в которых существенное значение имеет свойство вязкости жидкости. И, наконец, в тех случаях, когда явление определяется действием сил упругости, находит применение критерий подобия Коши Ch .

Среди сил, проявляющихся в динамических явлениях, с которыми мы сталкиваемся при проектировании судов, как правило, имеются объемные силы. Поэтому динамические пересчеты по подобному прототипу базируются в основном на критерии подобия Фруда. Лишь при изолированных пересчетах частот собственных колебаний корпуса можно базироваться на критерии Коши. Критерий же Рейнольдса, играющий столь важную роль в расчетах сопротивления воды движению судна, практически не находит применения в пересчетах по прототипу.

В связи с изложенным останавливаемся подробнее на критерии Фруда, согласно которому динамические системы будут подобны в случае соблюдения, наряду с требованиями геометрического подобия, условия ¹

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{gL}} = \text{const}, \quad (1)$$

где u — скорость, $m \cdot \text{сек}^{-1}$;

g — ускорение силы тяжести;

L — характерный линейный размер.

При этом силы, действующие в системах, будут связаны соотношением

$$\frac{K}{\rho g L^3} = \text{const}, \quad (2)$$

где K — сила, кг;

ρ — плотность, $\text{кг} \cdot \text{сек}^2 \cdot \text{м}^{-3}$.

Практически $\rho = \text{const}$ и, следовательно, в двух системах (индекс ноль относится к модели или судну-прототипу)

$$u = u_0 \lambda^{\frac{1}{2}};$$

$$K = K_0 \lambda^3.$$

Эти формулы позволяют установить переходные моменты также и для других физических величин, характеризующих яв-

¹ const означает одинаковый.

Таблица 1
Пересчеты, основанные на
геометрических соотношениях

Величины	Расчетная формула
Длина	$L = L_0 \lambda$
Площадь	$S = S_0 \lambda^2$
Объем	$V = V_0 \lambda^3$
Момент сопротивления	$W = W_0 \lambda^4$
• инерция площади	$I_x = I_{x0} \lambda^4$
Объемная сила, вес	$P = P_0 \lambda^3$
Момент объемной силы	$M = M_0 \lambda^4$
Углы	$\theta = \theta_0$

¹ Без учета прочности конструкций.

ние. Так, например, поскольку скорость выражается отношением

$$u = \frac{l}{T},$$

где T — промежуток времени, можно написать

$$\frac{u}{u_0} = \frac{l}{l_0} \frac{T_0}{T},$$

и, следовательно,

$$T = T_0 \lambda^{\frac{1}{2}}.$$

Последнее равенство связывает промежутки времени в двух подобных динамических системах, подчиняющихся критерию подобия Фруда.

Аналогично, выразив линейное ускорение отношением

$$a = \frac{u}{T},$$

найдем, что в двух подобных моделях

$$\frac{a}{a_0} = \frac{u}{u_0} \frac{T_0}{T} = \lambda^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\lambda^{\frac{1}{2}}} = 1.$$

Таким путем нетрудно получить формулы переходных множителей, приведенные в табл. 2, которая составлена применительно к технической системе единиц измерения, в которой в качестве основных единиц приняты длина L (м), сила K (кг) и время T (сек.). В таблице, наряду с общими формулами размерностей ряда величин, приведены также переходные множители, действительные для плавной, подчиняющейся критерию подобия Фруда (при $\lambda = 1$ дем). В формулах приняты следующие обозначения:

$$\lambda = \frac{L}{L_0}; \quad \kappa = \frac{K}{K_0}; \quad \tau = \frac{T}{T_0}.$$

Остановимся на примерах пересчета показателей проектируемого судна по прототипу в соответствии с табл. 2.

При таких пересчетах можно приближенно считать, что силы гидродинамического трения пропорциональны квадрату скорости. Это упрощающее допущение позволяет, как известно, применять критерий Фруда при исследовании плаваний, в которых, наряду с объемными силами, действуют также силы гидродинамического трения. В частности, при этом допущении можно воспользоваться формулами (1) и (2) для определения по прототипу полного сопротивления воды движению судна. На этом базируется применение

Таблица 2

Формы размерностей и переходные множители, соответствующие критерию Фруда

Величина	Формула	Переходные множители
Длина	l	λ
Время	τ	$\lambda^{\frac{1}{2}}$
Сила	κ	λ^3
Скорость	$u \tau^{-1}$	$\lambda^{\frac{1}{2}}$
Ускорение	$u \tau^{-2}$	1
Угловая скорость, число оборотов в единицу времени	τ^{-1}	$\lambda^{-\frac{1}{2}}$
Угловое ускорение	τ^{-2}	λ^{-1}
Масса	$\kappa \tau \lambda^{-1}$	λ^3
Момент инерции массы	$\kappa \tau^2 \lambda^{-1}$	λ^5
— силы, работы, энергии	$\kappa \lambda$	λ^3
Мощность	$\kappa \lambda \tau^{-1}$	$\lambda^{\frac{3}{2}}$
Давление	$\kappa \lambda^{-2}$	λ
Плотность	$\kappa \tau \lambda^{-3}$	1
Удельный вес	$\kappa \lambda^{-3}$	1

для расчетов буксировочной мощности формулы адмиралтейских коэффициентов

$$W_a = \frac{D^3 v^3}{C},$$

где W_a — буксировочная мощность, л. с. (метрические);

D — осевое водоизмещение, м;

v — скорость, узл.;

C — численный коэффициент.

Если мощность W выражена в квт/сек, а скорость — в м/сек, формула адмиралтейских коэффициентов приводится к безразмерному виду

$$C = \frac{V^3 v^3}{W},$$

где V — объемное водоизмещение.

При $n:u_0 = \lambda^{\frac{1}{2}}$ формула адмиралтейских коэффициентов дает

$$\frac{F}{F_0} = \lambda^{\frac{3}{2}}. \quad (3)$$

как это вытекает непосредственно из критерия Фруда (см. табл. 2).

При пересчетах корпуса корабля — яхта, наряду с требованием $F_F = \text{idem}$, должно быть соблюдено условие

$$n = n_0 \lambda^{-\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

связывающее числа оборотов гребных валов сопоставляемых судов. При сформулированных условиях можно приближенно принять, что коэффициенты влияния корпуса обоих судов будут примерно одинаковыми. Если известно, кроме того, основаны признавать примерно одинаковыми коэффициенты полезного действия машинной установки, то формулу (3) можно использовать при пересчете мощности механизмов N (поскольку $\eta_m = \text{idem}$). Таким образом, в этом случае можно написать

$$N = \frac{D^{\frac{2}{3}} \sigma^2}{C}; \quad N = N_0 \lambda^{\frac{3}{2}}. \quad (5)$$

При принятых допущениях требованиям подобия удовлетворяют и другие формулы типа

$$N = \frac{D^m \sigma^a}{C_1},$$

выражающиеся через линейный масштаб равенством

$$\frac{N}{N_0} = \frac{\lambda^{3m} \lambda^{\frac{1}{2}a}}{C_1} = \lambda^{3m + \frac{1}{2}a} \frac{1}{C_1}.$$

Учитывая формулу (5), можно написать

$$3m + \frac{1}{2}a = 3 \frac{1}{2},$$

в соответствии с чем нетрудно найти и ряд других соотношений, согласующихся с критерием Фруда, например

$$N = \frac{D^6}{C_1}; \quad \frac{D^{\frac{1}{3}} \sigma^2}{C_2}; \quad \frac{D^{\frac{1}{3}} \sigma^2}{C_3}; \quad \frac{D^{\frac{1}{3}} \sigma^2}{C_4}.$$

Критерии Фруда могут быть применены к пересчету показателей качки движущегося судна, если приближенное предположение

о геометрическом подобии сопоставляемых систем отнестя не только к форме судна, но и к положению их центра тяжести (или к метацентрической высоте) и к волновому профилю. Условием, связывающим числа оборотов гребных винтов, можно в рассматриваемом случае практически пренебречь.

При пересчете показателей качки соотношения между периодами колебаний t , угловыми амплитудами θ , угловыми скоростями $\dot{\theta}$, угловыми ускорениями $\ddot{\theta}$ и линейными ускорениями $\ddot{u}$ сопоставляемых судов выражаются следующими равенствами, вытекающими из табл. 2:

$$\left. \begin{aligned} t &= t_0 \lambda^{\frac{1}{2}}; \\ \theta &= \theta_0; \\ \dot{\theta} &= \dot{\theta}_0 \lambda^{-\frac{1}{2}}; \\ \ddot{\theta} &= \ddot{\theta}_0 \lambda^{-1}; \\ \ddot{u} &= \ddot{u}_0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

В рассматриваемом случае можно приближенно считать сопоставляемые суда подобными и в отношении зависимости, если не учитывать влияния, создаваемого ветром.¹

Показатели поворотливости можно пересчитывать по прототипу, если соблюдено условие (1) совместно с перечисленными выше условиями. В этом случае при одинаковых углах поворота руля судно и его модель или судно и его прототип, движущиеся с соответственными скоростями, будут описывать геометрически подобные траектории, имея одинаковые углы крена и дрейфа. Действующие силы, и в том числе силы давления на руль, будут изменяться пропорционально кубу линейных размеров.

Таким образом, для пересчета радиусов циркуляции R , углов крена на циркуляции δ и действующих сил можно написать формулы

$$\left. \begin{aligned} R &= R_0; \\ \delta &= \delta_0; \\ R &= R_0 \lambda^3. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

В заключение остановимся на вопросе о пересчете частот собственных колебаний корпуса судна. В этом случае подобие опреде-

¹ Для моделирования влияния ветра следовало бы поставить дополнительные условия, выполнение которых не может быть практически обеспечено. Подробнее вопрос рассмотрен в работе автора [29].

яется критериям Коши:

$$\left. \begin{aligned} r &= \text{idem}; \\ Ch &= \frac{r^3}{E} = \text{idem}; \\ \frac{K}{E I^3} &= \text{idem}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где r — коэффициент Пуассона;
 E — модуль упругости.

Практически r , E и r одинаковы в сопоставляемых системах, и потому вторая из формул (8) дает и $m = \text{idem}$.

Учитывая, что в пропорционально L^3 , можно также написать

$$\begin{aligned} b &= b_0 L^{-1}; \\ n &= n_0 L^{-1}, \end{aligned}$$

где в настоящем случае n — частота колебаний.

Последняя формула является расчетной при определении частоты собственных колебаний корпуса судна по прототипу.

§ 3. ОБЩЕЕ ПОНЯТИЕ О ПЕРЕСЧЕТАХ ПРИ УСЛОВНОМ ПОДОБИИ СОСТАВЛЯЕМЫХ СУДОВ

При проектировании формы судовой поверхности часто используются приемы, с помощью которых новый теоретический чертеж получается путем внесения закономерных изменений в аналогичный чертеж судна, принятого в качестве прототипа. Подобная задача решается особенно просто, если коэффициентами, характеризующими форму проектируемого судна и судна-прототипа, сохраняются одинаковыми и требуется лишь изменить главные размерения судна-прототипа. В этом случае, если соотношения главных размерений не слишком резко, новый теоретический чертеж может быть получен путем незначительного изменения масштабов теоретического чертежа-прототипа по длине, ширине и высоте.

Если, например, требуется изменить ширину судна в отношении $B : B_0 = b$, то ординаты любой внутренней линии при любом шапгоуте найдутся из соотношения $y = by_0$.

Еще проще перестроить теоретический чертеж судна-прототипа, если меняется только длина судна. В этом случае обады шапгоута на корпус теоретического чертежа остаются неизменными, а изменяется лишь расстояние между теоретическими шапгоутами и построение сводится к вычерчиванию нового бокового вида и полушироты по ординатам, перенесенным с корпуса на новую сетку двух других проекций. В случае необходимости длина носовой и кормовой оконечностей, а также длина цилиндрической остойки могут быть изменены в любой пропорции.

В тех случаях, когда требуется изменить осадку и высоту борта судна-прототипа в пропорции $H : H_0 = T : T_0 = t$, ординаты внутренней судна-прототипа переносятся на измененную сетку корпуса, а затем по перестроенному корпусу вычерчивается боковой вид.

Общий случай перестроения теоретического чертежа судна-прототипа сводится при таком подходе к суммированию независимых изменений длины, ширины и осадки. Как отмечалось, это соответствует аффинному преобразованию формы тела.

Описанный прием позволяет чрезвычайно быстро получить вполне согласованный теоретический чертеж. Ценность этого приема заключается также в том, что крайние теоретические элементы и некоторые другие важные показатели судна (например, показатели остойчивости на больших углах крена, некоторые показатели непотопляемости и пр.), соответствующие новому теоретическому чертежу, могут быть получены путем простейших пересчетов исходя из аналогичных величин, известных для судна-прототипа. Таким образом, оказывается возможным заранее, до вычерчивания нового теоретического чертежа, вычислять многие важные показатели судна применительно к ряду вариантов, отличающихся соотношениями главных размерений, и выбрать наиболее подходящее решение.

§ 4. ФОРМУЛЫ ПЕРЕСЧЕТА КРИВЫХ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

В табл. 3 приведены формулы для пересчета кривых плаваемости и начальной остойчивости проектируемого судна, которые могут быть использованы, если новый теоретический чертеж перестроен из теоретического чертежа судна-прототипа путем независимого

Таблица 3

Формулы для пересчета кривых плаваемости и начальной остойчивости

Элементы судна	Формула пересчета
Водоизмещение	$D = D_0 b t$
Полный момент инерцииATERЛЕННИ	$I = I_0 b^3 t$
• метакентрический радиус	$r = r_0 \frac{b}{t}$
Ордината центра тяжести	$z = z_0 t$
Полный момент инерцииATERЛЕННИ	$I = I_0 b^3 t$
• метакентрический радиус	$R = R_0 \frac{b^2}{t}$
Абсцисса центра тяжести и центра тяжестиATERЛЕННИ	$x = x_0$
Ордината центра тяжести судна	$Z_G = (Z_0) t$

изменения масштаба по длине, ширине и высоте в l , b и t раз. Индексом нуля в таблице отмечены величины, относящиеся кprototype.

Аналогичным способом может быть пересчитана вместимость отдельных отсеков судна. Приведенные формулы вытекают непосредственно из основных формул теории корабля, после замены в соответствующих интегралах переменных исходя из соотношений

$$x = lx_0; \quad dx = ldx_0;$$

$$y = by_0; \quad dy = bdy_0;$$

$$z = tz_0; \quad dz = tdz_0.$$

В качестве примера приводим вывод формулы пересчета поперечных моментов инерции ватерлиний, основывающийся на сопоставлении равенств

$$I_0 = \frac{2}{\delta} \int_{-\frac{1}{2}L_0}^{+\frac{1}{2}L_0} y_0^2 dx_0;$$

$$I = \frac{2}{\delta} \int_{-\frac{1}{2}L}^{+\frac{1}{2}L} y^2 dx = \frac{2}{\delta} b^2 l \int_{-\frac{1}{2}L_0}^{+\frac{1}{2}L_0} y_0^2 dx_0.$$

Из этих формул вытекает приведенное ранее равенство $I = I_0 b^2$.

В качестве модификации рассмотренных соотношений уместно привести следующие формулы, позволяющие построить в безразмерном виде кривые элементов, соответствующих спроектированным теоретическим чертежам:

$$K_1 = \frac{l}{L^2 b^2}; \quad K_2 = \frac{l}{L^2 b^2};$$

$$K_3 = \frac{t}{b^2}; \quad K_4 = \frac{t}{L^2};$$

$$K_5 = \frac{x}{L}; \quad K_6 = \frac{x}{L}.$$

При публикации данных серийных испытаний моделей желательным наряду с кривыми сопротивления и теоретическими чертежами моделей приводить и подобные кривые. Они могли бы оказать существенную помощь проектировщикам.

§ 2. ПЕРЕСЧЕТ ОСТОЙЧИВОСТИ НА БОЛЬШИХ УГЛАХ КРЕНА

Покажем прежде всего, что после произвольного изменения масштаба теоретического чертежа по ширине или высоте прямые линии, проведенные на корпусе судна-prototype, останутся прямыми

и искривятся лишь углы между соответствующими прямыми и осями координат. Для этого (рис. 1) проведем в плоскости чертежа произвольную прямую, уравнение которой в системе координат (x, y)

$$y = y_0 + Nx.$$

Угловой коэффициент N выразится через координаты произвольной точки $A(x_1, y_1)$, лежащей на рассматриваемой прямой, равенством

$$N = \frac{y_1 - y_0}{x_1}.$$

Изменим теперь масштаб чертежа вдоль оси абсцисс в b раз, а вдоль оси ординат — в t раз. Тогда точки y_0 и y_1 на оси ординат перейдут в точки ty_0 и ty_1 , а точка x_0 на оси абсцисс займет



Рис. 1. Искривление углов между прямыми при изменении масштаба чертежа по длине и высоте.



Рис. 2. Изменение длины отрезка прямой при изменении масштаба чертежа.

положение bx_0 . Далее через точки ty_0 и A_1 проведем новую прямую. Ее уравнение будет

$$y = ty_0 + N_1 x,$$

где

$$N_1 = \frac{t(y_1 - y_0)}{bx_0}.$$

Сопоставляя выражения угловых коэффициентов N и N_1 обеих прямых, найдем

$$N_1 = \frac{t}{b} N,$$

откуда

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{t}{b} \operatorname{tg} \theta_0.$$

Полученное выражение, связывающее углы наклона рассматриваемых прямых, не зависит от выбранного положения точки A

на исходной прямой. Поэтому мы приходим к выводу, что все точки исходной прямой после перестроения чертежа будут принадлежать прямой с угловым коэффициентом N_1 , что и требовалось доказать.

Определим теперь соотношения между длинами отрезков прямых на первоначальном и измененном чертеже. Для этого (рис. 2) возьмем в системе π_1 отрезок y_0 с проекцией A_0B_0 и изменим масштабы чертежа вдоль оси абсцисс в δ раз, а вдоль оси ординат — в t раз. Тогда после первого перестроения отрезок y_0 преобразуется в отрезок y_1 с проекцией A_1B_1 , а после второго перестроения — в отрезок y с той же проекцией A_1B_1 . Из чертежа следует, что

$$\frac{AB}{A_0B_0} = \delta = \frac{y \cos \theta}{y_0 \cos \theta_0}$$

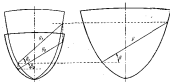


Рис. 3. Схема к расчету остойчивости судна на больших углах крена.

Таким образом,

$$y = y_0 \delta \frac{\cos \theta_0}{\cos \theta}$$

После этих предварительных замечаний исследуем показатели остойчивости проектируемого судна на больших углах крена после изменения масштабов теоретического чертежа судна-прототипа по ширине в $\delta = B/B_0$ раз и по высоте — в $t = H/H_0$ раз, как это показано на рис. 3 применительно к одному теоретическому шпангоуту.

При таком перестроении теоретического чертежа водонизмерные неаклоненные судна изменятся в δt раз. В той же пропорции изменится площадь треугольников, выходящих в воду и выходящих из воды,¹ и поэтому водонизмерные сопоставляемых судов, соответствующие наклонным ватерлиниям с ординатами y и y_0 , будут

¹ Так как даны отрезки горизонтальных ватерлиний, служащих основанием этих треугольников, изменятся в δ раз, а высоты треугольников — в t раз.

также отличаться друг от друга в δt раз. Иначе говоря, если ватерлиния с ординатой y_0 была равнообъемной в отношении судна-прототипа, то ватерлиния с ординатой y будет равнообъемной для судна с измененными размерами.

Углы наклона и ординаты ватерлиний проектируемого корабля, в соответствии с полученными ранее формулами, найдутся из соотношений

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{t}{\delta} \operatorname{tg} \theta_0;$$

$$y = y_0 \delta \frac{\cos \theta_0}{\cos \theta}.$$

Из последнего равенства следует, что поперечный момент инерции ватерлинии

$$I = I_0 \frac{y^2}{y_0^2} = I_0 \delta^2 \frac{\cos^2 \theta_0}{\cos^2 \theta}.$$

Учитывая, что

$$D = D_0 t,$$

можно также написать

$$p = p_0 \frac{y^2}{t} \frac{\cos^2 \theta_0}{\cos^2 \theta}.$$

Координаты центра тяжести при наклонении судна изменятся следующим образом:

$$y_c = (y_c)_0 t;$$

$$x_c = (x_c)_0 t,$$

где ордината x_c отсчитывается от положения центра тяжести неаклоненного судна.

Наконец, для восстанавливающих плеч остойчивости формы можно написать следующее выражение:

$$I_y = (y_c)_0 \delta \cos \theta + (x_c)_0 t \sin \theta.$$

С помощью этих простейших формул могут быть пересчитаны кривые элементов остойчивости при наклонении судна. Снятые значения исходных величин по кривым, построенным для прототипа и функции углов θ_0 , мы получим соответствующие им значения для измененного судна в функции углов θ .

Нетрудно также убедиться, что в случае изменения масштаба теоретического чертежа по длине ($L : L_0 = t, \delta = 1, t = 1$)

$$\delta = \theta_0;$$

$$p = p_0;$$

$$I_y = (I_y)_0.$$

Пересчет восстанавливающих плеч

Показатели	При θ_0				
	15	30	45	60	75
$\lg \delta = 0,352 \lg \delta_0$	0,356	0,550	0,592	1,06	3,85
$\delta = \arg \lg \delta$	14°20'	26°50'	43°40'	58°10'	74°40'
$\cos \theta$	0,960	0,876	0,723	0,517	0,270
$\sin \theta$	0,259	0,482	0,690	0,856	0,963
$1,05(\delta_0)_0 \cos \theta = A_1$	0,346	0,773	0,781	0,518	0,332
$(\delta_0)_0 \sin \theta = A_2$	0,065	0,237	0,234	0,412	0,578
$l_0 = A_1 + A_2$	0,323	0,860	1,015	1,030	0,910
$\alpha \sin \theta$	0,274	0,512	0,730	0,907	1,090
$l = l_0 - \alpha \sin \theta$	0,249	0,348	0,285	0,123	-0,110

§ 4. ПЕРЕСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НЕПОТОПЛЯЕМОСТИ

Рассмотрим случай затопления, симметричного относительно диаметральной плоскости, исходя из предположения, что длина судна и расстояние между водонепроницаемыми переборками



Рис. 4. Схема к пересчету показателей непотопляемости при увеличении судна.

увеличились в l раз, а ширина судна и высота борта остались неизменными. Условие задачи могут быть сформулированы следующим образом:

$$L = L_0; \quad B = B_0; \quad H = H_0; \quad D = D_0,$$

где D и D_0 — водоизмещения составляемых судов до затопления отсеков.

Конфигурация удлиненного судна и положение его аварийной ватерлинии, показанные на рис. 4, получены путем геометрического перестроения чертежа, относящегося к судну-прототипу. Покажем, что при таком перестроении условия равновесия не будут нарушены.

Пусть для судна-прототипа в аварийных условиях

$$(D_{\text{ав}})_0 = D_0 + \rho_0, \quad (9)$$

где $(D_{\text{ав}})_0$ — аварийное водоизмещение; ρ_0 — вес атакующей воды, которая рассматривается как жидкий груз. Из чертежа (рис. 4)

и, следовательно, диаграмма восстанавливающих плеч остойчивости формы останется неизменной. Наконец, как это следует из теории подобия, при увеличении всех главных размеров в λ раз ($l = b = t = \lambda$)

$$\delta = \delta_0;$$

$$\rho = \rho_0 \lambda^3;$$

$$l_0 = (l_0)_0 \lambda.$$

При пересчетах остойчивости на больших углах крена может быть использована либо кривая

$$\delta_0 = f(\theta_0),$$

либо кривые

$$(\delta_0)_0 = f(\theta_0);$$

$$(z_0)_0 = f(\theta_0),$$

относящиеся к судну-прототипу.

В первом случае строится кривая

$$\rho = f(\theta)$$

и соответствующая ей полярная диаграмма остойчивости, на основе которой определяются восстанавливающие плечи формы l_0 .

Во втором случае значения функций

$$\rho_0 = f(\theta_0),$$

$$z_0 = f(\theta_0),$$

$$l_0 = f(\theta_0)$$

могут быть получены путем непосредственных пересчетов.

Ниже в качестве примера приведен пересчет по прототипу плеч остойчивости формы l_0 и полных восстанавливающих плеч l в предположении, что

$$b = 1,05; \quad t = 1,00,$$

Кроме того, для прототипа и проектируемого судна возмещение центра тяжести над центром волнения принято равным

$$\alpha = 1,06 \text{ м.}$$

Необходимые для пересчета данные по прототипу приведены ниже:

θ_0	15°	30°	45°	60°	75°
δ_0	0,37	0,58	1,00	1,73	3,73
$(\delta_0)_0$	0,50	0,84	1,08	1,14	1,17
$(z_0)_0$	0,08	0,18	0,34	0,48	0,60
l_0	0,20	0,38	0,32	0,37	-0,13

а сам пересчет сведен в табл. 4.

Из табл. 4 можно видеть, что пересчет остойчивости на больших углах крена по прототипу не требует большой затраты времени.

следует, что для трансформированного судна

$$\left. \begin{aligned} D_{aa} &= (D_{aa})_f; \\ \rho &= \rho_f. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Кроме того, по условиям задачи

$$D = D_f. \quad (11)$$

Сопоставив формулу (9) с формулами (10) и (11), нетрудно убедиться, что для перестроенного чертежа условие

$$D_{aa} = D + \rho$$

удовлетворяется и, следовательно, равновесие между силами веса и силами поддержания не нарушается.

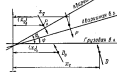


Рис. 5. Изменение момента сил, действующих при затоплении отсеков, в случае удлинения судна.

также вокруг центра тяжести и центра величины сами силы, поскольку они должны располагаться перпендикулярно к новой аварийной ватерлинии. Вследствие этого должен был возникнуть дополнительный неуравновешенный момент, стремящийся вновь изменить дифферент судна.

Таким образом, следует признать, что, изменив чертеж судна-прототипа по длине, мы нарушили условия равновесия в отношении действующих моментов в аварийных условиях. Нетрудно, однако, показать, что это не вносит существенной погрешности в конечные результаты. Для этого допустим, что центр тяжести и центр величины аварийного судна-прототипа расположены на одном уровне и, следовательно, совпадают. В этом случае изменение длины судна не связано (см. рис. 5) с появлением дифференцирующего плеча и момента.

Заметим, что при принятом допущении в метасентрической формуле продольной остойчивости $H = R - a \approx R$, так как $a = 0$. Это позволяет утверждать, что погрешность, вызванная тем, что мы пренебрегаем дифференцирующим моментом при удлинении

аварийного судна-прототипа, не превосходит погрешности, которую мы допускаем, заменяя в метасентрической формуле остойчивости продольную метасентрическую высоту продольным метасентрическим радиусом.

Таким образом, можно считать, что после изменения длины судна силы P и D расположены на одной вертикали и что дифференцировка судна не нарушилась. Приращение осадки носом, кормой, а также дифферент после затопления найдутся из соотношений

$$\left. \begin{aligned} \Delta T &= (\Delta T)_f; \\ \operatorname{tg} \phi &= \frac{1}{t} \operatorname{tg} \phi_f. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

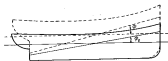


Рис. 6. Схема к расчету показателя непотопляемости при изменении высоты борта.

Исходя из аналогичных рассуждений нетрудно убедиться, что в случае, когда

$$L = L_f; \quad B = B_f; \quad H = H_f$$

показатели непотопляемости судна с измененной шириной выражаются формулами

$$\left. \begin{aligned} \Delta T &= (\Delta T)_f; \\ \operatorname{tg} \phi &= \operatorname{tg} \phi_f. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Наконец, если

$$L = L_f; \quad B = B_f; \quad H = H_f t,$$

формулы расчета (рис. 6) принимают вид

$$\left. \begin{aligned} \Delta T &= t (\Delta T)_f; \\ \operatorname{tg} \phi &= t \operatorname{tg} \phi_f. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Из формул (12), (13) и (14) следует, что если при симметричном относительно диаметральной плоскости затоплении отсеков судно оставалось на плаву, то непотопляемость судна не будет нарушена после изменения масштабов по длине, ширине или высоте. Изменение длины и ширины судна не сказывается на осадках носом и кормой. В случае же изменения масштаба по высоте осадки пропорциональны высоте борта.

Остановимся теперь на вопросе об аварийной остойчивости судна с симметрично затопленными отсеками в предположении, что в конечных условиях затопления оно сохраняет положительную метацентрическую высоту и, следовательно, не получает крена.

Уравнения остойчивости для судна-прототипа в неопределенном состоянии и аварийных условиях могут быть представлены следующим образом:

$$h_0 = z_0 + \rho_0 - Z_0;$$

$$h_a = z_a + \rho_a - Z_a,$$

где h_0 и h_a — начальная метацентрическая высота.

$+A_1, -A_2$

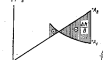


Рис. 7. Зависимость отношения B/T на изменение начальной остойчивости при затоплении отсеков.

Применяя формулы, приведенные в § 4, при рассмотрении остойчивости незатопленного и затопленного судна, можно, если решить задачу способом постоянного подкачивания, написать для трансформированного судна:

$$h = z_0 + \rho_0 \frac{B}{I} - Z_0 f;$$

$$h_a = z_a + \rho_a \frac{B}{I} - Z_a f.$$

Вычитая почленно из второго уравнения первое, найдем, что после затопления отсеков метацентрическая высота трансформированного судна изменилась на величину

$$\Delta h = h_a - h = (z_a - z_0) f + (\rho_a - \rho_0) \frac{B}{I}.$$

Эта формула может быть представлена в безразмерном виде следующим образом:

$$\frac{\Delta h}{B} = \frac{z_a - z_0}{T_0} \frac{T}{B} + \frac{\rho_a - \rho_0}{B_0} \frac{T_0}{B_0} \frac{B}{T} = A_1 + A_2, \quad (15)$$

где

$$A_1 = \frac{z_a - z_0}{T_0} \frac{T}{B};$$

$$A_2 = \frac{\rho_a - \rho_0}{B_0} \frac{T_0}{B_0} \frac{B}{T}.$$

Из формулы (15) следует, что поправка $\Delta h/B$ убывает с увеличением отношения B/T вследствие уменьшения в правой части формулы первого положительного члена и увеличения второго отрицательного члена. Последний изменяется при этом по линейному, а первый

член — по гиперболическому закону. Общий характер изменения отношения $\Delta h/B$ показан на рис. 7, из которого видно, что лишь при малых значениях B/T относительная метацентрическая высота h/B может увеличиться в результате затопления отсеков. В интервале отрицательных приращений отношения $\Delta h/B$ начальная остойчивость относительно более широкого судна снижается в аварийном состоянии в большей степени, чем остойчивость более узкого судна. Кривые $+A_1$ и $-A_2$ пересекаются приблизительно при $\frac{B}{T} \approx 2,3$.

Формула (15) может быть использована для определения аварийной остойчивости судна в ряде вариантов, отличающихся соотношениями главных размеров, если для исходного варианта известны значения величин z и ρ до и после подкачивания отсеков.

§ 7. РАСЧЕТЫ ОБЩЕЙ ПРОЧНОСТИ СУДА. ЧАСТОТА СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ КОРПУСА

При изменении размеров судна по длине, ширине и высоте скелы, вызывающие общий изгиб корпуса, изменяется пропорционально произведению ΔB , плечи, на которые действуют силы, — пропорционально I , а моменты этих сил — пропорционально $\rho \Delta B$. В соответствии с этим можно пересчитывать момент, изгибающий судно на тихой воде, по формуле

$$M_1 = (M_0) \rho \Delta B.$$

Одновременно момент инерции сечения эквивалентного бруса, соответствующий ему момент сопротивления и напряжения изменяются следующим образом:

$$I = I_0 \Delta B^2 = I_0 \rho^2 \Delta B^2; \quad W = W_0 \rho \Delta B; \quad \sigma = \sigma_0 \frac{\rho}{I}.$$

Если арифметическое преобразование распространяется и на волновой профиль, то для расчета дополнительных моментов от действия волн можно воспользоваться соотношением

$$M_2 = (M_0) \rho \Delta B.$$

Совпадением с аналогичным равенством, приведенным выше, при рассмотрении изгиба корпуса на тихой воде.

В более общем случае, когда отклонение расчетных длин волн $\lambda_a : (\rho \lambda)_0 = I$, а отношение их расчетных высот $h_a : (h_0)_0 \neq I$, можно приближенно написать

$$M_2 = (M_0) \rho \Delta B \frac{h_a}{(h_0)_0}.$$

Нетрудно сообразить, что последняя формула дает точное решение, если применить ее к армопленному судну.

Частота свободных колебаний корпуса может быть подсчитана по формуле

$$n = n_0 \sqrt{\frac{e}{\rho V L^3}}, \quad (16)$$

которую мы приводим без вывода [29]. В этой формуле

$$e = \frac{E}{E_0}; \quad I = \frac{J}{J_0} = \delta I_0^2; \quad \mu = \frac{m}{m_0} = \delta \mu,$$

где E — модуль упругости;

J — момент инерции сечения корпуса по модели-аналогу;

m — масса судна.

Из этой формулы следует, что для вертикальных колебаний при $e = 1,0$

$$n_0 = (n_0)_0 \frac{I}{\mu}.$$

Для горизонтальных колебаний, принимая во внимание, что в этом случае $I = \delta^2 I_0$, получим

$$n_0 = (n_0)_0 \frac{\delta}{\mu}.$$

Формула (16) может быть также представлена в виде

$$n = C \sqrt{\frac{E I}{\rho V L^3}},$$

где C — практический коэффициент, устанавливаемый по прототипу;
 V — объемное водозмещение.

Глава третья

НАГРУЗКА СУДНА И ИЗМЕРИТЕЛИ ВЕСОВ

§ 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О НАГРУЗКЕ СУДНА

Под нагрузкой судна понимается совокупность весов, из которых складывается его водозмещение. Ведомости, в которые заносятся эти веса, называются таблицами нагрузки. В таблицах нагрузки указывается также положение центра тяжести отдельных весов и соответствующие им моменты.

Во время разработки проекта и постройки судна нагрузка подсчитывается несколько раз. Первые, наиболее грубые подсчеты нагрузки по укрупненным измерителям с использованием различных приближенных зависимостей производятся в ряде приближений при определении элементов проектируемого судна.

Более детально подсчитываются проектные таблицы нагрузки, которые составляются при разработке предпроектного проекта (если таковой стался предусмотрен), а затем в эскизном и техническом проектах. Для этих расчетов полнее используются чертежи общего расположения, конструктивные чертежи и различные схемы. Веса же контргрузных устройств заносятся в таблицы нагрузки в соответствии с данными технических условий.

При разработке рабочих чертежей на каждом чертеже представляется вес конструкции. Данные, полученные таким путем, используются для корректировки таблиц нагрузки технического проекта. Такую исправленную проектную нагрузку называют исполнительной. Последняя, в свою очередь, корректируется с учетом данных, полученных при изготовлении конструкций в натуре, если такое изготовление производится в процессе постройки судна. Учетываются также результаты обмера осадок и опытного определения положения центра тяжести судна. Исправленные таблицы исполнительной нагрузки называются отчетными.

Таблицы нагрузки являются одним из важнейших документов, обосновывающих в каждом частном случае тактико-технические элементы судна, указанные в договорной спецификации. Действительно, на расчетах нагрузки базируется в той или иной степени большинство других основных судостроительных расчетов, например расчеты начальной остойчивости, остойчивости на больших углах крена, дифферента, непотопляемости, прочности, качки, вибрации

корпуса, скорости хода. Ошибки, допущенные при измерении весов, равным образом как и погрешности в оценке положений их центра тяжести, могут привести к тому, что построенное судно не будет удовлетворять гарантийным цифрам по водоизмещению, осадке, остойчивости и другим показателям судна.

Таблицы нагрузки проектируемых и построенных судов имеют и более общее значение как чрезвычайно ценный исполнительный материал, который широко используется в дальнейшей проектной работе по другим судам. В начальных стадиях проектирования они служат для определения необходимых весовых измерителей, для уточнения составленной в первом приближении нагрузки проектируемого судна и для определения элементов проектируемого судна способом пересчета по прототипу. Составление нагрузки проектируемого судна с таблицами нагрузки подопытных прототипов является одним из средств анализа качества предлагаемого сооружения и степени достоверности гарантируемых цифр.

Таблицы нагрузки используются также для технологического планирования постройки судна, для составления калькуляции его стоимости, для контроля над весомой дисциплиной как при разработке рабочих чертежей, так и в процессе постройки судна и т. п.

Переходя к вопросу о номенклатурной разработке весов, отметим, что рекомендации, относящиеся к составлению предварительной нагрузки, приведены в § 3. В соответствии с этим в настоящем параграфе даются лишь характеристики стандартных таблиц, используемых для проектной, исполнительной и отчетной нагрузки.

Таким таблицам необходимы для того, чтобы избежать пропуска весов при подсчете нагрузки и для получения сопоставимых результатов. Стандартные таблицы нагрузки, в которых веса классифицируются по характеру и назначению соответствующих конструкций, используются во всех морских странах. Преследуя одинаковые цели, они все же отличаются друг от друга, так как при объединении весов в группы можно исходить из различных принципов.

В отечественной практике принято разбивать нагрузку на разделы. Каждый раздел делится на группы, группы, в свою очередь, — на подгруппы, а подгруппы — на статьи. Таблицы нагрузки гражданских судов содержат следующие десять разделов:

- Кр — корпус.
- Мх — механизмы.
- Сх — системы.
- Эх — электрооборудование, связь, управление.
- Жг — жидкие грузы (в корпусе в механизмах).
- Сж — сыпучие, экзотик и провансы.
- Зв — запас водоизмещения.
- Гр — перевозимый (так называемый коммерческий) груз.
- Тп — топливо, вода и масло.
- Бл — балласт.

В разделе «Корпус» входят следующие группы:

- А — голый корпус.
- В — оборудование помещений.
- Б — судные устройства.

Группа «Голый корпус» охватывает вес металлического корпуса (подгруппа I), включая надстройки; мостики, рубки, мачты, грузовые краны, дымовые трубы, дымоходы, шахты, а также веса фундамента и подкреплений (подгруппа II), делаясь вещей, деревянных частей корпуса, окраски, изоляции, покрытия полов (подгруппы III—V/II). Веса механизмов и котлов в разделе «Механизмы» даются по «сухому» весу. В разделе «Системы» входят лишь судовые системы и их механизмы с электрооборудованием; трубопроводы же относятся к разделу «Механизмы». Вес электродвигателей с обслуживающими механизмами входит в раздел «Электрооборудование, связь и управление». В разделе «Жидкие грузы» входят, с одной стороны, остаток воды, топлива и масла в корпусных и местных цистернах, ледовых мешках, действующих трубах, а с другой стороны, — жидкие грузы в механизмах и трубопроводах. В разделе «Сыпучие, экзотик и провансы» наряду с другими грузами, водятся вес топлива, воды и масла, предназначенных для отопления и освещения помещений, а также действия бая, камбузов и т. п. Вес пассажирские багажом, как разным образом, и вес провансы и воды, предназначенных для пассажиров, входит в раздел «Перевозимый груз». В девятом разделе учитываются запасы топлива, воды и масла, предназначенные для действия главных механизмов.

В таблицах нагрузки военных кораблей вместо веса перевозимого груза учитываются вес вооружения (артиллерийского, торпедного, минного и т. д.) и вес соответствующих боеприпасов. Кроме того, в них фигурирует вес бронирования и другие веса, специфические для военного судостроения.

Необходимо иметь в виду, что приведенная классификация весов базируется на принципе объединения конструкций, имеющих общее назначение. В соответствии с этим механизмы систем отнесены к разделу систем. К весу электрооборудования (а не механизмов) отнесены веса дизель- и турбогенераторов электрического тока, входящие в группу электрооборудования. Якоря, цепи, тросы и шлюпки, которые за границей относят часто к снабжению, рассматриваются, по указанным выше соображениям, как составные части якорного, швартового и шлюпочного устройств и, таким образом, их веса входят в вес корпуса.

Разбивка весов, принятая в иностранных флотах, отличается от отечественной разбивки как числом основных разделов нагрузки, так и принципами, положенными в основу группировки весов. В соответствии с этим нужно проявлять большую осторожность при сопоставлении нагрузки советских судов с аналогичными материалами по иностранным судам.

¹ Более подробные сведения о интересующем вопросе читатель может получить, ознакомившись с оригинальными стандартными таблицами.

Для получения полного представления о тактико-технических и эксплуатационных качествах судна необходимо знать его показатели при разных характеристых условиях нагрузки.

Для военных кораблей принято рассматривать пять характерных случаев нагрузки, соответствующих водозмещению: порожнем, стандартному, нормальному, полному и наибольшему. Применительно к этим водозмещениям и выполняются проектные расчеты, обосновывающие гарантируемые тактико-технические показатели корабля. Основное значение при определении элементов корабля придает нормальному водозмещению.

Водозмещением порожнем называется водозмещение совершенно готового корабля, снабженного механизмами, вооружением и всем необходимым, что должно находиться на корабле в военное время, согласно утвержденной спецификации, но без личного состава, боезапасов, снабжения, продовольствия и без запасов топлива, смазочных материалов, питательной, береговой и питьевой воды в цистернах. Таким образом, в рассматриваемом случае не входит в нагрузку веса следующих разделов: «Топливо, вода и масло», «Снабжение, экипаж и провизия».

«Жидкие грузы» в корпус, механизмах и трубопроводах входят в водозмещение порожнем.

Стандартным водозмещением называется водозмещение готового корабля, полностью укомплектованного личным составом, снабженного всеми механизмами и готового к выходу в море, включая все вооружение и боезапас, всекое снаряжение, оборудование, продовольствие и пресную воду для личного состава, различные запасы и все необходимое, что должно находиться на корабле в военное время, согласно утвержденной спецификации, включая запасы топлива, смазочных материалов и питательной воды, во с преской и заборной водой и маслом в системах механизмов, котлах, теплых ядках и сточных масляных цистернах, т. е. включая вес механической установки, готовой к действию. Таким образом, в стандартное водозмещение входят все веса, за исключением весов, включенных в раздел «Топливо, вода и масло».

Нормальное водозмещение, или, иначе говоря, водозмещение при официальных испытаниях, отличается от стандартного водозмещения тем, что в него включается 50% запаса топлива, питательной воды и масла, соответствующего гарантированной дальности плавания.

В полное водозмещение включается полный запас топлива, питательной воды и смазочных материалов, соответствующий гарантированной дальности плавания.

Наконец, наибольшее водозмещение отличается от полного водозмещения тем, что в него включается дополнительный боевой запас, который корабль может принять в оборудованные потреба-

ции на залуемые минные пути сверх нормального запаса, а также дополнительные запасы топлива, смазочных материалов и питательной воды, которые могут быть приняты при полном заполнении всех помещений, предназначенных для хранения этих грузов.

Из перечисленных состояний нагрузки общее значение и для гражданского судостроения имеют случаи нагрузки, соответствующие водозмещению порожнем и полному водозмещению (водозмещению в полном грузу). В отличие от приведенного выше определения, в гражданском судостроении в водозмещение порожнем обычно включают также вес собственно снабжения из раздела «Снабжение, экипаж и провизия»¹. Показатель «наибольшее водозмещение» к гражданским судам исключено, так как их полное водозмещение исчисляется при осадке по грузовую марку и, таким образом, прием дополнительных грузов исключается.

Грузы, обуславливающие разность между полным водозмещением гражданского судна и водозмещением порожнем, составляют так называемый дедейт. Таким образом, в дедейт входит полезный груз, перевозимый судном, который характеризует его чистую грузоподъемность, вес пассажиров с багажом, вес топлива, масла и питательной воды, а также вес команды, продовольствия, питьевой и мыльной воды из раздела «Снабжение, экипаж и провизия». В мировой практике вес жидкого балласта, если он применяется при полном водозмещении, входит в дедейт. На гражданских судах к дедейту относят также вес воды в бастионах для купания. Такие бастионы имеются на пассажирских судах и некоторых танкерах.

При проектировании и эксплуатации гражданских судов представляют интерес и промежуточные случаи нагрузки между нагрузкой, соответствующей водозмещению порожнем и водозмещению в полном грузу. В каждом частном случае выбор тех или иных промежуточных случаев нагрузки обуславливается спецификой судна. В проектных расчетах остойчивости и дифферента обычно рассматривают от трех-четырех (для вспомогательных судов) до шестнадцати (для транспортных судов) характерных случаев нагрузки. В частности, для транспортных судов представляют интерес нагрузки при подходе к порту назначения, нагрузка в конце обратного рейса с остатками топлива, воды и масла, нагрузка в балластном пробеге, нагрузка без груза или с половинным количеством груза и пассажиров на борту и другие характерные случаи нагрузки.

При выборе расчетных случаев нагрузки должны быть учтены, по крайней мере, минимальные требования, сформулированные в правилах, регламентирующих остойчивость гражданских судов [40].

¹ В стандартных таблицах вес расходных материалов относят к дедейту. Ввиду малости этого веса он в дальнейшем не отделяется от веса названного снабжения.

Задача начальной стадии проектирования сводится к определению элементов судна таким образом, чтобы, удовлетворяя заданному образом требованиям задания и ряду других условий, они в то же время обеспечивали судну необходимую плавучесть. Решая эту задачу, невозможно определить водоизмещение судна путем точных расчетов нагрузки не только из-за отсутствия необходимых чертежей, но и потому, что размеры судна являются в это время еще искомыми величинами. Поэтому возникает необходимость связать отдельные элементы, входящие в нагрузку, с водоизмещением судна, его элементами и заданными показателями.

Формулы, конкретизирующие общий вид подобных зависимостей, мы будем называть модулями, а коэффициенты пропорциональности, связывающие модули с весами, — измерителями.

Весовые измерители не отличаются большой стабильностью, вследствие чего попытка базироваться на их средних статистических цифрах часто приводит к весьма грубым ошибкам. С другой стороны, при определении элементов проектируемого судна обычно удается получить вполне приемлемые результаты даже при помощи весовых приближенных функциональных зависимостей, если входящие в них измерители устанавливаются путем пересчета по нагрузке проектируемого судна-прототипа, мало отличающегося по своим размерам и особенностям от проектируемого судна. В случае необходимости такая нагрузка предварительно «исправляется», т. е. в нее вносят изменения, учитывающие различия между проектируемым судном и прототипом в архитектурном типе и конструктивных деталях (например, в числе палуб, числе главных переборок, конфигурации надстроек и т. п.).

При решении более сложных задач, связанных с анализом влияния изменений элементов судна на его водоизмещение, мощность механизмов и мореходные качества, соблюдение отмеченных выше условий не всегда обеспечивает необходимую точность расчетов. Поэтому в подобных случаях приходится пользоваться более сложными расчетными правилами и формулами, позволявшие отражающими качественную сторону явления.

Задача создания подобных функциональных зависимостей, связывающих веса с элементами судна, которые позволяли бы с достаточной точностью решать задачи, возникающие в начальной стадии разработки проекта, и не приходила бы в то же время к чрезмерно громоздким расчетам, в настоящее время полностью еще не решена. Более того, многие из предложенных для этой цели многочисленных формул недостаточно еще изучены с точки зрения их точности и удобоприменимости.

В начальных стадиях разработки проекта при подсчете нагрузки

неудобно пользоваться схемой, изложенной в § 1 настоящей главы. Возникающие затруднения связаны с тем, что эта схема не согласуется с функциональными зависимостями, которыми принято выражать отдельные веса. То же относится и к систематизированным практическим данным для определения измерителей, входящих в эти зависимости. Так, например, укрупненные измерители веса корпуса, которые приводятся в различных источниках, обычно даются уже с учетом веса систем и электрооборудования. В стандартных же таблицах нагрузки системы и электрооборудование выделены в отдельные разделы. В практических данных, относящихся к весу механизмов, указывается обычно не «сухой» вес, как это предусмотрено в стандартных таблицах, а «мокрый» вес, учитывающий наличие жидких грузов. Далее, в стандартных таблицах нагрузки дана топливная бытовая нагрузка в раздел «Снабжение, экипаж и провизия». Между тем в практических данных расход топлива на механическую установку часто указывается с учетом бытовых нужд. Число подобных примеров можно было бы увеличить.

Учитывая это обстоятельство, целесообразно при определении элементов проектируемого судна разбивать нагрузку на следующие укрупненные веса:

- P_K — вес корпуса;
- P_B — вес бронирования корпуса (при отсутствии брони снаг-мое опускается);
- $P_{\text{пг}}$ — вес переходного груза и пассажиров или вооружения и боезапас;
- P_M — вес механизмов;
- P_T — вес топлива, пресной воды и масла;
- $P_{\text{см}}$ — вес снабжения, расходных материалов и команды (с провизией);
- P_A — запас асбестовидения.

Для пояснения принятой разбивки весов следует отметить, что в раздел «Топливо, пресная вода и масло» не введена мыльная (береговая) и ильменная вода, которая, как и в стандартных таблицах, отнесена к разделу «Снабжение, расходные материалы и команда». Механизмы и трубопроводы учитываются по «мокрому» весу, а жидкие грузы в корпусе отнесены к корпусу.

Вес корпуса

$$P_K = P_{\text{ст}} + P_{\text{об}}$$

делится на две составляющие: вес стали в составе корпуса $P_{\text{ст}}$, включающий веса фундаментов и подкреплений, и вес оборудования $P_{\text{об}}$. Таким образом $P_{\text{ст}}$ соответствует подгруппам I и II группы А раздела Кр стандартных таблиц нагрузки. К весу же $P_{\text{об}}$ в начальных стадиях проектирования относят обычно веса систем, электрооборудования, твердого балласта, дельных ящиков, деревянных частей корпуса, окраски, изоляции, покрытия полов, оборудования

помещений, судовых устройств и остатков жидких грузов в корпусе. В стандартных таблицах эти веса означены разделами Ст (системы) и Эл, а также группами Б и В раздела Кр, подгруппами III—VII группам А раздела Кр, группами А раздела Жг и группой А раздела Ба.

При определении элементов гражданских судов вес корпуса рассчитывают иногда более детально на следующие составляющие:

$$P_k = P'_{ст} + P_k + P_g + P_{об},$$

где $P'_{ст}$ — вес стали в составе основного корпуса без надстроек;

P_k — вес надстроек без оборудования;

P_g — вес рубок без оборудования.

Если при проектировании гражданского судна задается не чистая грузоподъемность и число пассажиров, а дедвейт $P_{дв}$, то в соответствии с приведенными ранее указаниями следует принимать

$$P_{дв} = P_k + P_g + P'_{ст},$$

где $P'_{ст}$ — вес команды, пресной воды и провизии из раздела снабжения. Вес нижеперечисленного и расходных материалов P'_k на гражданских судах отнесен к весу корпуса.

§ 4. СООТНОШЕНИЯ ВЕСОВ

Соотношения составляющих нагрузки, перечисленных в предыдущих параграфах, могут меняться в широких пределах в зависимости от эксплуатационных и тактических характеристик судна. С увеличением, например, скорости хода возрастает в процентном отношении вес механизмов, а усиление защиты на военных кораблях приводит к увеличению относительного веса бронирования. При всех прочих равных условиях соотношения весов в значительной степени зависят от типа машинной установки и дальности плавания. Влияние типа машинной установки обуславливается как различием удельным (отнесенным к одной лошадиной силе) весом механизмов, так и различием удельным расходом топлива. При изменении размеров судна, в частности его водоизмещения, отдельные веса изменяются не в одинаковой пропорции, в соответствии с чем соотношения весов зависят также от размеров судна.

Цифры, приведенные в табл. 5 и 6, дают представление о пределах изменения весов по основным разделам нагрузки гражданских судов и военных кораблей.

Для того чтобы дать себе отчет в значениях типа машинной установки в общем балансе нагрузки, интересно сопоставить удельный вес механизмов различных типов. В приведенных ниже ориентировочных цифрах (в процентах), имеющих лишь иллюстративное значение, за 100% принят вес паровых турбоузелных установок

гражданских судов. Рассмотрев приведенные ниже цифры, можно иметь в виду, что подобные соотношения могут изменяться в широких пределах в зависимости от мощности установки, ее назначения и других обстоятельств.

Таблица 5

Соотношения весов, входящих в нагрузку гражданских судов (в процентах от водоизмещения)

Тип судна	P_k	P_g	$P_{дв}$
Пассажирские	40—55	20—30	15—40
Грузовые	35—55	5—10	60—75
Наливные	20—30	5—10	60—75
Буекеры	50—55	25—35	12—20
Троллеры	40—50	10—20	30—50

Таблица 6

Соотношения весов, входящих в нагрузку военных кораблей (в процентах от водоизмещения)

Классы кораблей	P_k	P_g	P_k	P_g	P_r	P_c
Линейные корабли	28—40	22—40	12—22	6—12	3—12	1—2
Тяжелые крейсера	28—34	14—33	13—15	10—20	11—15	2—3
Легкие " "	34—38	16—22	10—15	12—20	7—10	2—3
Эскадренные миноносцы	32—36	0—2	10—15	32—38	10—16	3—4

Установки для гражданских судов

Турбоузелные	100 %
Турбоэлектрические	130
Дизельные с зубчаткой передаточной и высокоскоростные дизельные	140
Малооборотные дизельные	170
Паровые агрегаты с паротурбинными котлами	140
" " " " электродвигателями	200

Установки для военных кораблей

Для катеров с бензиновыми моторами	2
Турбоузелные	30
Дизельные для подводных лодок и малых подводных кораблей	30

Для характеристики роли машинной установки в общем балансе нагрузки уместно также отметить, что турбинные установки с малым оттоком пара потребляют в 1½—2 раза больше топ-

днее, чем дизельные установки. При машинных же установках с поршневыми двигателями и котлами, работающими на угле низкой калорийности, расход топлива может возрасти в 4—5 раз по сравнению с дизельными установками.

§ 5. КЛАССИФИКАЦИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ, ВЫРАЖАЮЩИХ ВЕС КОРПУСА. ФОРМУЛЫ ПЕРВОЙ ГРУППЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭТОГО ВЕСА

Функциональные зависимости, связывающие вес корпуса с элементами судна, могут быть разбиты на следующие группы:

1. Эмпирические формулы наиболее простого вида, полученные путем статистической обработки нагрузок построенных или спроектированных судов.

2. Эмпирические формулы, полученные путем статистической обработки нагрузок, составленных на основе достаточно точных расчетов применительно к ряду судов с систематически изменяющимися элементами.

3. Формулы, полученные путем приближенного учета условий, определяющих прочность корпуса.

4. Формулы, в основу которых положен принцип детальной разбивки веса корпуса на большое количество составляющих.

Наиболее грубыми формулами для нахождения веса корпуса, отнесенными к первой группе, можно пользоваться при определении элементов проектируемого судна в первом приближении. Они построены в предположении, что этот вес пропорционален либо водоизмещению судна, либо произведению из его главных размеров, либо другим простыми комбинациям из главных размеров судна. Чаще всего применяются формулы

$$P_k = p_k D; \quad (17)$$

$$P_k = g_k LBN, \quad (18)$$

в которых коэффициенты пропорциональности p_k и g_k являются константами веса корпуса, отнесенными к водоизмещению и кубическому модулю. Приравняв правые части формул (17) и (18), нетрудно найти следующую зависимость, связывающую измерители p_k и g_k :

$$p_k = g_k \frac{1}{\gamma} \frac{H}{T}, \quad (19)$$

где γ — удельный вес воды.

Формула (18) обычно приводит к более точным результатам, чем формула (17), однако иногда удобнее оперировать водоизмещением, а не кубическим модулем. В подобных случаях, учитывая формулу (19), можно пользоваться зависимостью

$$P_k = \frac{g_k}{\gamma} \frac{H}{T} D.$$

Часто формула (18) заменяется зависимостью

$$P_k = g_k (LBN + W_n) = g_k LBN_1,$$

где W_n — объем надстроек, простирающихся от борта до борта; H_1 — приведенный высота борта, которая подсчитывается по формуле¹

$$H_1 = H + h_n \frac{L_n}{L} + \frac{1}{3} h_n,$$

где h_n — высота надстроек;

L_n — суммарная длина надстроек;

h_n — средняя седловатость, равная полусумме седловатостей в носу и корме, которая не всегда учитывается при определении высоты H_1 .

Иногда при определении элементов судна в расчетные формулы вместо кубического модуля LBN вводится одна из квадратных модулей

$$L(B+H); \quad L(B+2H).$$

однако соответствующие этим модулям коэффициенты пропорциональности менее стабильны, чем отнесенные выше измерители. Более точные результаты можно получить, используя комбинациями модулей, т. е. считая, что часть весов, входящих в вес корпуса, изменяется пропорционально водоизмещению или кубическому модулю, а остальная часть — пропорционально квадратичному модулю. Таким путем могут быть получены формулы

$$P_k = g_k [D + kL(B+2H)];$$

$$P_k = g_k [LBN + kL(B+2H)]$$

или их разновидности

$$P_k = g_k \left[D \frac{L}{H} + kL(B+2H) \right].$$

¹ В каждом частном случае коэффициентами k в последних трех формулах рационально придавать численные значения, при которых слабое, пропорциональное водоизмещению или кубическому модулю, примерно в два раза больше слабого, пропорционального квадратичному модулю.

Как отмечалось, вес корпуса часто разбивают на вес стального корпуса (исключая сталь в надстройках и рубках) и вес оборудования. В этом случае для подсчета веса стального корпуса P_{st} обычно применяют формулы

$$P_{st} = g_{st} LBN,$$

$$P_{st} = g_{st} LBN_1.$$

¹ Здесь и в дальнейшем предполагается, что члены равно от вертикальной черты могут включаться или не включаться в формулу.

Аналогично формулам

$$P'_{\text{ст}} = g'_{\text{ст}} L B H,$$

$$P'_{\text{ру}} = g'_{\text{ру}} L B H,$$

пользуются для подсчета веса стали в основном корпусе без надстроек и рубок. В этом случае вес стали и дерева в составе надстроек и рубок определяется по формулам

$$P_n = g_n W_n,$$

$$P_r = g_r W_r,$$

где W_n — объем надстроек;
 W_r — объем рубок.

При этом для определения веса оборудования гражданских судов применяют формулы

$$P_{\text{об}} = p_{\text{об}} D^{\frac{2}{3}};$$

$$P_{\text{об}} = p_{\text{об}} P_{\text{ст}}^{\frac{2}{3}};$$

$$P_{\text{об}} = p_{\text{об}} (L B H)^{\frac{2}{3}};$$

$$P_{\text{об}} = p_{\text{об}} L (B + 2H).$$

Пределы изменения некоторых из наиболее употребительных измерителей могут быть охарактеризованы следующими цифрами:

$$g_n = \frac{P_n}{L B H} = 120-180 \text{ кг/м}^3 \text{ — для грузовых судов};$$

$$g_n = \frac{P_n}{L B H} = 180-240 \text{ кг/м}^3 \text{ — для пассажирских судов};$$

$$g_r = \frac{P_r}{L B H} = 90-120 \text{ кг/м}^3 \text{ — для гражданских судов};$$

$$g_n = \frac{P_n}{W_n} = 75-100 \text{ кг/м}^3 \text{ при } \frac{L}{L} = 0,90-0,10;$$

$$g_r = \frac{P_r}{W_r} = 75-80 \text{ кг/м}^3.$$

При определении по прототипу необходимых измерителей следует учитывать соотношения, приведенные в § 9.

§ 6. ФОРМУЛЫ, ТАБЛИЦЫ И ГРАФИКИ, ОТНОШЕННЫЕ КО ВТОРОЙ ГРУППЕ

Из материалов для определения веса стального корпуса, полученных путем статистической обработки нагрузок применительно к ряду судов с систематически изменяющимися элементами, отметим прежде всего формулы В. А. Семки [42]. Эти формулы, опубликованные в 1930 г., были получены для элементов гражданских судов с поперечной системой набора и соответствуют действовавшим во второй половине тридцатых годов правилам классификационных обществ.

В настоящее время формулы В. А. Семки несколько устарели, однако мы можем еще успешно пользоваться, наряду с них дополнительный практический коэффициент, определяемый по прототипу.

После этого исходная формула В. А. Семки представится в виде

$$P_{\text{ст}} = k (P_{\text{ст}} + P_{\text{об}}),$$

где k — практический коэффициент, который должен быть определен по прототипу;

$P_{\text{ст}}$ — вес стального корпуса судна, не имеющего надстроек;

$P_{\text{об}}$ — условный вес стали в надстройках, простиравшихся от борта до борта,¹ полученный как разность между полным весом стали в составе нагрузки судна с надстройками и весом $P_{\text{ст}}$.

Вес $P_{\text{ст}}$ определяется по следующим формулам, полученным суммированием равенств, соответствующих отдельным конструктивным элементам корпуса:

$$P_{\text{ст}} = [a_1 + a_2 (1-f) + a_3] \frac{L B H}{1000};$$

$$a_1 = \frac{370}{B + 4,0} + 0,313L + 2,65 (H - 5,0) + 37,68 \frac{15,3 - N}{H + 2};$$

$$a_2 = \frac{77}{B + 4,0} + 0,05L - 0,21H - 4,0 (1,6 - N);$$

$$a_3 = 47,3 \left(1 + \frac{H}{B} \right) \frac{n-1}{N} + \frac{n}{B};$$

$$f = \frac{T_{\text{ст}} - T}{T_{\text{ст}} - T_{\text{об}}},$$

где n — число палуб;

a — коэффициент, зависящий от числа палуб;

¹ В. А. Семка вводит понятие об условном весе стали в надстройках в связи с тем, что наличие надстроек оказывает влияние на вес стали основного корпуса.

$T_{\text{вн}}$ — осадка, соответствующая судну с минимальным надводным бортом;

$T_{\text{нв}}$ — осадка, соответствующая (по правилам определения надводного борта) судну со сниженной надстройкой;

T — осадка по конструктивную материалю.

Коэффициент α принимает следующие значения:

α	1	2	3	4
	+14,3	0	-8,1	-33,0

Ниже даны формулы для определения условного веса стали юта — P_1 , бака — P_2 , средней надстройки — P_3 , удлиненного юта — P_4 , удлиненного бака — P_5 :

$$P_1 = \left[6,3 (H + 22,0 + C_1 f) \frac{h}{B} + 1,8 (B + 33,0) \right] \lambda + 1,16 \frac{L B}{1000};$$

$$P_2 = \left[11,6 (H + 8,0 + C_1 f) \frac{h}{B} + 2,7 (B + 23,0) \right] \lambda \frac{L B}{1000};$$

$$P_3 = \left[25,5 (H + 1,6) \frac{h}{B} + 100,0 \right] \lambda + 5h + C_2 f \frac{L B}{1000};$$

$$P_4 = \left[24,2 (H + 3,0) \frac{h}{B} + 92,0 \right] \lambda + 3,6h + C_2 f \frac{L B}{1000};$$

$$P_5 = \left[26,8 (H + 1,7) \frac{h}{B} + 92,0 \right] \lambda + 3,6h + C_2 f \frac{L B}{1000};$$

$$C_1 = 4,0 (H + 10,0); \quad C_2 = 66,0 \frac{h}{B} - 2,75,$$

где h — высота надстройки;

$\lambda = \frac{L}{L_0}$ — относительная длина надстройки.

Приведенные формулы относятся к клепальным судам с широко распространенными пиллерсами, имеющим стандартную осадочность. Число водонепроницаемых переборок принято равным 0,046L + + 0,85. Объем дала люков принят равной 0,33L при ширине 0,33B. В вес стали не включены вес фундаментов, коридоров гребных валов, бушпритных переборок, фальшборта, мачт и рубок.

Вес коридоров гребных валов В. А. Семена предлагает определять по формуле

$$P_6 = 26,0 (H + 3,2) \frac{L_0 h}{1000},$$

где L_0 и h_0 — длина и высота коридора гребного вала.

Для веса мачт с танкалом и фальшборта даны формулы

$$P_7 = 0,26 \frac{L + 120 (L/B)}{12H} \frac{L B}{1000}; \quad P_8 = 0,011 L f (B_0 + 0,3),$$

где L_0 — длина фальшборта;

f — толщина листов (обычно 6,5—7,5 мм);

h_0 — высота фальшборта.

В последних трех формулах переход от клепальных конструкций к сварным должен быть учтен введенным reduцированным коэффициентом, равного приблизительно 0,85.

Суммируя вес $P_{\text{ст}}$ и ΣP_i , получим полный вес стали в составе корпуса и надстроек.

Существенным недостатком формул В. А. Семена является их громоздкость. Для того чтобы избежать этого недостатка, некоторые специалисты, следуя тем же путем, что и В. А. Семена, аппроксимировали полученные результаты и представляли их в табличной форме или в виде графиков.

Из материалов такого рода заслуживают внимания графики Г. Рестера, которые воспроизведены ниже в виде таблиц, заимствованных из книги [1]. Графики Г. Рестера были построены в соответствии с результатами подсчета веса стального корпуса для пяти серий грузовых судов длиной от 2000 до 12 000 м при шестнадцати типах палубных надстроек. Вес подсчитывался по модели-шлюпгоуту, причем вводились поправочные коэффициенты, установленные по подробным нагрузкам судов. Были рассмотрены суда с коэффициентами общей полноты равными 0,74; 0,76 и 0,78, отличающиеся числом палуб.

В оригинальной работе Г. Рестера, как и в приведенной ниже табл. 7, результаты подсчетов представлены в виде зависимостей, выражающих измеритель веса стального корпуса без надстроек $g_{\text{ст}}$ в функции кубического модуля для ряда отношений длины судна к высоте борта. Вес выражен в килограммах, а кубический модуль — в кубических метрах. Отношение длины к высоте борта варьирует в пределах от 10 до 15. Каждому значению кубического модуля соответствуют определенные значения отношения L/B и числа палуб.

Если отношение L/B отличается от приведенного во втором столбце, то вес стали увеличивается при более высоких значениях L/B и уменьшается при меньших L/B на 2% для приращения $\Delta \frac{L}{B} = 0,1$.

Если число палуб отличается от указанного в третьем столбце таблицы, то для каждой дополнительной палубы вес стали увеличивается в зависимости от отношения длины судна к высоте борта следующим образом:

$\frac{L}{B}$	10	11	12	13	14	15
$\Delta P_{\text{ст}}, \%$	3,00	4,35	5,50	6,75	8,00	9,25

Для малых шестеренчатых судов измеритель $g_{\text{ст}}$ должен быть взят меньше на 6,5%, а для больших — на 5%. Если коэффициент

общей полноты больше или меньше чем 0,76, вес стали соответственно увеличивается или уменьшается на 0,3% для $\Delta\delta = 0,01$.

Приведенные цифры относятся к классным корпусам.

Таблица 7

Коэффициент веса стального корпуса (без надстроек)

$$K_{ст} = \frac{P_{ст}}{LBN} \text{ по Растеру}$$

LBN, м³	L, м	Число палуб	K _{ст} при отношении $\frac{L}{H}$					
			10	11	12	13	14	15
4 000	6,56	1,37	121	122	123	125	127	130
6 000	6,64	2,03	114	115	118	120	123	125
8 000	6,72	2,59	110	111	113	116	120	124
10 000	6,80	2,77	107	108	110	113	117	122
12 000	6,88	2,93	105	107	109	112	115	120
14 000	6,96	3,10	104	105	107	110	114	119
16 000	7,04	3,27	103	104	106	109	113	118
18 000	7,12	3,43	102	104	106	109	113	117
20 000	7,20	3,50	102	103	105	108	112	117
22 000	7,28	3,57	102	103	105	108	112	117
24 000	7,35	3,63	102	103	105	109	113	118
26 000	7,44	3,70	102	104	106	109	113	118
28 000	7,52	3,77	102	104	106	109	113	118
30 000	7,60	3,83	103	104	107	110	114	119
32 000	7,68	3,90	103	105	107	110	115	120
34 000	7,76	3,97	103	105	108	111	116	121
36 000	7,84	4,03	104	106	108	112	117	122

В табл. 8 приведены данные Растера по весам стальных классных надстроек в зависимости от их типа и дефлекта судна. Вес надстроек выражен в килограммах и отнесен к одному кубическому метру объема надстроек.

В цифровой работе приводятся также данные по весу рубок в зависимости от дефлекта судна. Цифры Растера приводят к выводу, что относительный вес рубок, отнесенный к единице их объема, весьма стабильны. Нетрудно убедиться, что в среднем

$$g_2 = \frac{P_2}{V_2} = 90 \text{ кг/м}^3$$

с точностью до $\pm 0,7\%$.

С исследованием Растера весьма схожа по подходу к решению рассматриваемой задачи работа Г. Рабена [63]. Она базируется на подсчетах веса стального корпуса 153 судов с поперечной системой набора по правилам Английского Lloyd's 1939—1940 гг. Вес определяется по трем носовым и трем кормовым сечениям

Таблица 8

Измеритель веса стальных классных надстроек

$$g_2 = \frac{P_2}{V_2} \text{ по Растеру}$$

Характеристики надстроек			g ₂ при дефлектах (кг)				
тип	длина, % от L	H/L	200	300	600	800	12 000
B	10	0,10	128	121	117	116	115
B	30	0,35	90	86	85	85	85
B+Ю	20	0,30	95	93	91	90	90
B+Ю	40	0,60	85	83	81	80	80
B+C	30	0,60	130	108	106	105	105
B+C	70	1,60	105	103	101	100	100
B+C+Ю	40	0,80	105	103	101	100	100
B+C+Ю	70	1,50	98	96	94	93	93
B+CЮ	90	2,95	90	88	86	85	85
B+C+Ю	97	2,24	80	77	74	73	73

Обозначения: B—борт, C—переборки надстроек, Ю—ют, B+C+Ю—узеловый борт и узловой ют, соединяющий со средней надстройкой.

при классных и сварных корпусах. Судя отчасти из архитектурным типом и коэффициентом общей полноты. Коэффициенты полноты мидель-плангоута были приняты равными $\beta = 0,96$ для малых судов и $\beta = 0,99$ — для больших судов. Предполагалось, что суда имеют два ряда широко растоянных надстроек.

Рабен представил полученные результаты в виде графиков, выражающих измеритель веса стального корпуса $P_{ст}$ в функции от приведенного кубического модуля LBN , и коэффициента общей полноты при нескольких значениях отношения длины судна к высоте борта. На рис. 8—10 приведены графики $P_{ст}$ в функции от минимальных надстроек бортом, имеющим одну, две и три палубы. Аналогичные графики на рис. 11—12 относятся к судам со сплошной надстройкой, имеющим две и три палубы. На всех рисунках, кроме рис. 11, для каждого $L:H$ дается три кривые. Верхняя относится к судну без надстроек, средняя — к судну со средней надстройкой длиной $l_n = 0,20L$, а нижняя кривая дана в предположении, что $l_n = 0,40L$.

Вес надстроек другого типа может быть определен по графику, приведенному на рис. 13. Этот график выражает зависимость измерителя $g_2 = \frac{P_2}{V_2} = f(W_2)$ для юта, короткой средней надстройки и борта. Рис. 13 совместно с отмеченными ранее рисунками позволяет определить вес стали при любых надстройках.

Г. Рабена даны в переработанном виде применительно к метрической системе единиц измерения.

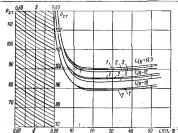


Рис. 8. Вес стали в составе корпуса клеваных однопалубных судов с минимальным надводным бортом по Рабену.
1 — однопалубные суда при $L_b = 0$; 2 — суда с надстройкой при $L_b = 0.12$; 3 — суда с надстройкой при $L_b = 0.41$.

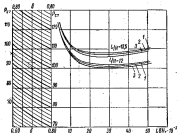


Рис. 9. Вес стали в составе корпуса клеваных двухпалубных судов с минимальным надводным бортом по Рабену.
1 — двухпалубные суда при $L_b = 0$; 2 — суда с надстройкой при $L_b = 0.12$; 3 — суда с надстройкой при $L_b = 0.41$.

Приведенные графики относятся к клеваным судам. Аналогичные графики приведены в работе [62].

Автор [28] предложил в свое время формулу

$$P_{ст} = g_{ст} A_1 A_2 A_3 \lambda^{\frac{1}{3}} \left(\frac{L}{H} \right)^{\frac{1}{3}} L B H, \quad (20)$$

предназначенную для определения веса стали в составе корпуса транспортных судов.

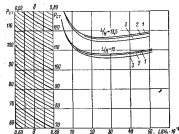


Рис. 10. Вес стали в составе корпуса клеваных трехпалубных судов с минимальным надводным бортом по Рабену.
1 — трехпалубные суда при $L_b = 0$; 2 — суда с надстройкой при $L_b = 0.12$; 3 — суда с надстройкой при $L_b = 0.41$.

Коэффициент A_1 в формуле (20), зависящий от архитектурного типа судна, равен:

- $A_1 = 1,0$ — для судов с минимальным надводным бортом;
- $A_1 = 0,94$ — для малых шельтердечных судов;
- $A_1 = 0,95$ — для больших шельтердечных судов.

Коэффициент A_2 , учитывающий число палуб, может быть уточнен в зависимости от отношения L/H по данным Растера. В среднем он равен

- $A_2 = 1,00$ — для однопалубных судов;
- $A_2 = 1,06$ — для двухпалубных судов;
- $A_2 = 1,12$ — для трехпалубных судов.

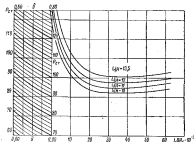


Рис. 11. Вес стали в составе корпуса мелких двухпалубных судов со спонсоной надстройкой по Рабну (плавно криво от проективности надстроек и полечей рубок).

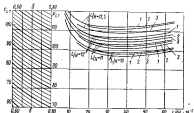


Рис. 12. Вес стали в составе корпуса мелких трехпалубных судов со спонсоной надстройкой по Рабну.
1 — надпалубные суда при $L_0 = 0$; 2 — суда с надстройкой при $L_0 = 0,29L$;
3 — суда с надстройкой при $L_0 = 0,40L$.

Коэффициент A_3 зависит от длины судна:

для судов длиной 70—150 м $A_3 = 1,0$;

для судов длиной менее 70 м $A_3 = \frac{2,9}{L^{0,25}}$.

Коэффициент $g_{ст}$ подобно другим весовым измерителям. Должен устанавливаться по проекту.

Путем обработки опубликованных статистических данных, характеризующих влияние элементов судна на вес стального корпуса гражданских судов, автор получил также следующую формулу:

$$P_{ст} = g_{ст} A_1 A_2 A_3 \frac{1}{5} L^{\frac{1}{4}} L^{\frac{1}{4}} B^{\frac{3}{4}} H^{\frac{1}{2}}. \quad (21)$$

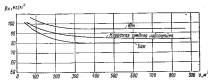


Рис. 13. Вес надстроек по Рабну.

Формула (21) относится к полному весу стали в корпусе и надстройках. Коэффициенты A_i имеют те же численные значения, что и в предыдущей формуле.

Нижне приведены значения коэффициентов $g_{ст}$ и $g_{ст}'$ в формулах (20) и (21), подсчитанные для трех грузовых судов со следующими характеристиками:

Грузоподъемность, м . . .	1000	5000	10000
Длина, м	70	115	155
Набор бортов		Поперечный	
« деки		Продольный	
Лесной класс	«Л»	«УЛ»	«Л»
Сталь	СХЛ-1	СХЛ-1	СХЛ-1
$g_{ст}$, кг/м ³	31,7	29,8	24,4
$g_{ст}'$, кг/м ^{2,5}	211	222	196

Полученные цифры относятся к судам с поперечно-продольной системой набора, отличающейся от чисто поперечной системы, на которой базируются приведенные в настоящем параграфе графики и формулы. Применение стали повышенного сопротивления сказка-

лось в основном на вес стального корпуса третьего судна, а наиболее тяжелые ледовые подкрепления имело второе судно. Эти обстоятельства должны были сказаться на численных значениях рассмотренных коэффициентов.

§ 7. ФОРМУЛЫ ТРЕТЬЕЙ ГРУППЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕСА СТАЛИ В СОСТАВЕ КОРПУСА

Вес продольного набора, под которым мы будем понимать суммарный вес связей, учитываемых в эквивалентном бруске, составляет значительную долю веса металлического корпуса¹.

Этим объясняются многочисленные попытки вывести расчетные формулы для определения рассматриваемой составляющей веса корпуса исходя из критерия общей прочности судна. Первые исследования этого вопроса относятся ко второй половине прошлого столетия, однако формулы для определения веса продольного набора, которые применяются в настоящее время в различных модификациях в начальных стадиях разработки проекта, основываются на идеях, развитых в более позднем исследовании А. П. Фандер-Флота, опубликованном в 1924 г. [8].

Приближенные формулы, полученные таким путем, вследствие ряда условных допущений, принимаемых при их выводе, не могут внести полную ясность в рассматриваемый вопрос. Все же они позволяют выделить параметры, оказывающие наиболее существенное влияние на вес продольного набора.

Остановившись прежде всего на вопросе о зависимости момента сопротивления профиля от его геометрических характеристик, в частности от площади поперечного сечения.

Обычно о степени выгодности профиля судят либо по коэффициенту утилизации профиля

$$\eta = \frac{W}{FN},$$

либо по удельной площади профиля

$$C = \frac{W^{\frac{1}{2}}}{F}.$$

В настоящем случае мы будем понимать под W , F и N соответственно момент сопротивления эквивалентного бруса, площадь поперечного сечения эквивалентного бруса и высоту борта судна.

Для геометрически подобных профилей коэффициенты η и C являются постоянными величинами. С изменением же формы профиля численные значения коэффициентов η и C изменяются в широких пределах. При профилях в виде полых коробов они зависят

в основном от положения нейтральной оси и относительной площади стенок, материал которых работает менее эффективно, чем материал поясков. В дальнейшем мы будем определять положение нейтральной оси отношением

$$z = \frac{z}{H},$$

где z — расстояние нейтральной оси от килля. При правильном конструировании набора корпуса (по расчету) отношение $z = z/H$ определяется соотношениями напряжений в днище, вызванных обходом волнами судна и волнами динца как судного перекрытия. О том, насколько рационально расположена нейтральная ось, можно судить по коэффициентом утилизации материала в днище и верхней палубе, которые (если не считать некоторых частных случаев) должны мало отличаться от единицы.

В табл. 9 приведены значения коэффициентов η и C , рассчитанные для семи двухпалубных гражданских судов с минимальным

Таблица 9

Характеристики профиля эквивалентного бруса гражданских судов

Тип судна	L_b м	B , м	H , м	T , м	F , см ⁴	$z = \frac{z}{H}$	η	$\frac{z^2}{\eta}$	$\frac{C}{L^{\frac{1}{2}}}$
С минимальным эквивалентным бортом	80	12,3	6,40	3,24	5390	0,382	0,456	0,336	0,0510
	90	13,3	7,29	3,78	6870	0,383	0,472	0,330	0,0497
	100	14,3	8,00	4,30	8740	0,390	0,482	0,315	0,0483
	110	15,3	8,80	4,73	9320	0,405	0,506	0,312	0,0503
	120	16,3	9,60	5,25	11150	0,423	0,542	0,320	0,0496
	130	17,3	10,40	5,71	12680	0,445	0,568	0,308	0,0498
	140	18,3	11,20	6,21	14490	0,430	0,596	0,308	0,0503
Широкопалубный	80	12,3	6,40	3,86	5730	0,382	0,452	0,338	0,0506
	90	13,3	7,29	4,57	6490	0,382	0,474	0,308	0,0500
	100	14,3	8,00	5,27	7620	0,394	0,498	0,311	0,0498
	110	15,3	8,80	5,90	8790	0,402	0,500	0,308	0,0477
	120	16,3	9,60	6,54	10220	0,412	0,536	0,306	0,0507
	130	17,3	10,40	7,07	11570	0,412	0,548	0,300	0,0490
	140	18,3	11,20	7,60	13490	0,428	0,588	0,312	0,0496

надрывным бортом и семи шестердечных судов длиной от 80 до 140 м¹. С увеличением длины судна коэффициент η в рассмотренных случаях возрастает в пределах

$$\eta = 0,45 - 0,60,$$

¹ При составлении табл. 9 были использованы данные, приведенные в справочнике [66] за 1923 г.

Практически можно принять для судов с минимальным надводным бортом

$$\eta = 0,0502L^{\frac{1}{2}},$$

а для шельтердечных судов

$$\eta = 0,0492L^{\frac{1}{2}}.$$

Погрешность первой формулы в рассмотренных случаях не превышает $\pm 1,5\%$, а погрешность второй формулы $\pm 8\%$.

Из табл. 11 можно также усмотреть, что относительная ордината нейтральной оси ϵ возрастает с увеличением размеров судна, но отношение $\frac{\epsilon^3}{\eta}$ сравнительно стабильно. В среднем для судов с минимальным надводным бортом

$$\eta = 3,13\epsilon^3,$$

а для шельтердечных судов

$$\eta = 3,23\epsilon^3$$

с точностью до $\pm 3\%$.

Тенденция к возрастанию коэффициента утилизации профиля с увеличением длины судна является общей для судов многих типов. Она объясняется тем, что с увеличением длины судна отношение напряжений от местного изгиба дна к суммарным напряжениям в днище уменьшается.

Перейдем теперь к выводу расчетных формул для определения веса продольного набора. Остановимся сначала на судах, набор которых определяется по расчету, причем ограничимся рассмотрением случая, когда нейтральная ось расположена ниже, чем точка с ординатой $Z = 0,5H$. В этом случае для наиболее удаленной от нейтральной оси фибры верхней палубы можно написать

$$\frac{M_{\max}}{W} = \sigma, \quad (22)$$

где $M_{\max}$ — максимальный изгибающий момент на вершине или подбине волны у модели;

W — момент сопротивления верхней палубы;

σ — допустимые напряжения в настиле верхней палубы.

Выразим момент сопротивления через площадь поперечного сечения эквивалентного бруса и коэффициент утилизации поперечного сечения соотношением

$$W = \frac{1}{2} F H \eta,$$

представим формулу (22) следующим образом:

$$F = 2 \frac{M_{\max}}{H \sigma \eta}. \quad (23)$$

Остановимся на отдельных величинах, входящих в формулу (23). В соответствии с нормами, регламентирующими расчеты общей прочности судов,

$$\sigma = 0,2\sigma_1 \left(3 + \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \right)$$

или, что то же,

$$\sigma = 0,2\sigma_1 \left(3 + \frac{M_{\max}}{M_{\min}} \right),$$

где σ_1 — предел текучести стали.

В этой формуле

$$\frac{M_{\max}}{M_{\min}} \leq 1,0,$$

Обычно для одновитных судов отношение $\frac{M_{\max}}{M_{\min}}$ отклоняется от его средних значений не более чем на $\pm 10\%$, в соответствии с чем величина

$$3 + \frac{M_{\max}}{M_{\min}}$$

отличается относительно большой стабильностью. Это дает основание рассматривать σ как величину постоянную для одновитных судов при одинаковом материале корпуса.

Максимальный изгибающий момент

$$M = M_1 + M_2$$

находится суммированием изгибающего момента M_1 — на таковой воде и дополнительного изгибающего момента M_2 — из волне. Для приближенной оценки моментов M_1 и M_2 обычно применяются формулы вида

$$M_1 = \frac{DL}{\lambda};$$

$$M_2 = DL \frac{h_b}{T} \frac{f(x)}{k} = \frac{1}{h_b} DL \frac{h_b}{T},$$

где h_b — высота волны. Отношение $f(x)/k$ более или менее стабильно. В соответствии с этим полный изгибающий момент можно выразить формулой

$$M_{\max} = \frac{DL}{\lambda} \left(1 + \frac{h_b}{k_1 T} \right). \quad (24)$$

Численные значения коэффициентов, фигурирующих в формуле (24), не отличаются большой стабильностью, но в каждом частном случае они могут быть в известной мере уточнены путем анализа расчетов общей прочности по подходящим прототипам.

Внеся в формулу (23) $M_{\max}$ его значением, найдем

$$F = \frac{2}{k} \frac{1}{\alpha_1} D \frac{L}{H} \left(1 + \frac{k}{k_1} \frac{h_2}{T} \right). \quad (25)$$

Естественно считать, что вес продольных связей $P_{\text{св}}$ пропорционален длине судна и площади сечения эквивалентного бруса. Судя по некоторым статистическим данным, этот вес приблизительно пропорционален также корню кубическому из коэффициента общей полноты. Поэтому, приняв $\alpha = \text{const}$, можно написать

$$P_{\text{св}} = K_2 \delta^{\frac{1}{3}} \frac{DL}{\gamma} \frac{L}{H} \left(1 + \frac{k}{k_1} \frac{h_2}{T} \right), \quad (26)$$

где K_2 — практический коэффициент.

В отечественной практике высота волны h_2 принимается равной

$$h_2 = \frac{L}{30} + 2.$$

Из других величин, входящих в формулу (26), коэффициент утилизации η и отношение k/k_1 должны рассматриваться как неизвестные функции элементов судна. Отношение k/k_1 зависит, кроме того, от формы кривой нагрузки. Поэтому формула (26) не может быть непосредственно использована для практических целей. Проверочные расчеты позволяют заменить ее приближенной формулой

$$P_{\text{св}} = K_2 \delta^{\frac{1}{3}} \frac{DL^{\frac{1}{2}}}{\gamma} \frac{L}{H}, \quad (27)$$

в которой измененный показатель степени при длине судна учитывает влияние отброшенных множителей.

Численное значение коэффициента K_2 в формуле (27) должно устанавливаться по прототипу.

Формула (27) не имеет универсального значения для судов рассматриваемого типа. Так, например, на малых судах толщина листов наружной обшивки может определяться не условиями прочности, а требованиями, предъявляемыми к долговечности судна. Естественно, что формулы (26) и (27) не могут применяться к таким судам.

Вес поперечного набора рассматриваемых судов может быть подсчитан по формуле

$$P_{\text{пн}} = \rho_{\text{ст}} L (B + H),$$

однако, учитывая, что он мал по сравнению с весом продольного набора, целесообразнее отнести формулу (27) к полному весу стали, приняв

$$P_{\text{ст}} = K_3 \delta^{\frac{1}{3}} \frac{DL^{\frac{1}{2}}}{\gamma} \frac{L}{H}.$$

При методе расчетной формулы для определения веса продольного набора применительно к судам, набор которых определяется по правилам классификационных обществ, можно исходить из стандарта общей прочности гражданских судов, согласно которому момент сопротивления площади сечения эквивалентного бруса выражается формулой

$$W = BT f(L).$$

Функция $f(L)$ задается в табличной форме. С точностью до $\pm 2\%$ можно принять

$$f(L) = 8,0L^{\frac{5}{3}}$$

и считать, что

$$W = 8,0 B T L^{\frac{5}{3}}.$$

Выразив, как и в предыдущем случае, момент сопротивления формулой

$$W = \frac{1}{2} F H \eta,$$

представим предыдущее равенство в виде

$$F = 16,0 \frac{BT}{H \eta} L^{\frac{5}{3}}.$$

Считая, что вес продольного набора пропорционален площади F , длине судна и корню кубическому из коэффициента общей полноты, найдем

$$P_{\text{св}} = K_1 \frac{L^{\frac{5}{3}} L B T}{H \eta} L^{\frac{5}{3}}.$$

Приняв, наконец, в соответствии с приведенными ранее данными

$$\eta = K_4 L^{\frac{1}{3}},$$

мы получим для определения веса продольного набора гражданских судов следующие формулы:

$$P_{\text{св}} = K_5^{-\frac{2}{3}} D \frac{L}{H} L^{\frac{1}{3}}; \quad (28)$$

$$P_{\text{св}} = K_5^{\frac{1}{3}} L B H \frac{T}{H} \frac{L}{H} L^{\frac{1}{3}}. \quad (29)$$

При определении по прототипу коэффициентов пропорциональности в формулах (27), (28) и (29) могут возникнуть затруднения, поскольку в таблицах нагрузки вес продольного набора обычно

объединяется с весом поперечного набора. Поэтому для судов с набором по правилам классификационных обществ целесообразнее определять вес стали в составе корпуса с помощью графиков, таблиц или формул, приведенных в предыдущем параграфе.

§ 4. ФОРМУЛЫ ЧЕТВЕРТОЙ ГРУППЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕСА КОРПУСА

Последовательная детализация формул, используемых для определения веса корпуса, приводит в конечном счете к способу поэтапной пересчета весов по нагрузке судна-прототипа, который был предложен И. Г. Бубновым в 1946 г. Способ И. Г. Бубнова [9] отличается следующими принципиальными достоинствами.

1. Разделение веса корпуса (и других укрупненных весов) на большое число составляющих весов позволяет подобрать для каждой составляющей наиболее подходящие функциональные зависимости.

2. При поэтапном пересчете весов легче учесть влияние конструктивных особенностей судна и особенностей его формы.

3. Раздельное рассмотрение отдельных весов, входящих в вес корпуса и нагрузку судна, позволяет одновременно сравнительно точно определить положение центра тяжести судна по высоте.

4. Если формулы, выражающие отдельные веса, входящие в вес корпуса, имеют ту же степень точности, что и обобщенная формула веса корпуса, то вероятная погрешность расчетов по дифференцированным формулам будет меньше, чем по обобщенной формуле.

Современная практика не создала еще единой обобщенной системы формул для поэтапного пересчета весов. Первые формулы такого рода, предложенные А. И. Балкашиным [3], были составлены применительно к способу пересчета главных размеров проектируемого судна по И. Г. Бубнову. В формулы А. И. Балкашина входят длина, ширина и осадка судна, но они не учитывают влияния высоты борта и коэффициента общей полноты. Кроме того, эти формулы недостаточно точно отражают влияние требований, предъявляемых к прочности судна, на вес набора корпуса. Так, например, исходя из предположения, что поверхность наружной обшивки пропорциональна произведению $L(B+2T)$, а ее толщина пропорциональна длине судна, А. И. Балкашин предложил определять вес наружной обшивки по формуле

$$P_2 = k_2 L^2 (B + 2T),$$

где k_2 — практическая постоянная.

Эта формула более или менее произвольно учитывает влияние длины судна на толщину наружной обшивки. Влияние же высоты борта на толщину наружной обшивки не учитывается вовсе. То же

самое можно сказать о формуле для определения веса верхней палубы

$$P_2 = k_2 L^2 B$$

и других аналогичных зависимостях.

Отмеченный недостаток присущ также ряду формул для определения веса связей, входящих в эквивалентный брус, предложенных другими специалистами.

В предлагаемой расчетной схеме (см. табл. 10) вес корпуса частично определяется по формуле (27), учитывающей приближенно условия общей прочности, а не путем детального пересчета исходя из длины или поверхности отдельных связей эквивалентного бруса. Кроме того, формулы построены таким образом, что они приближенно учитывают также влияние высоты борта и коэффициента общей полноты при подсчете веса конструкций, не имеющих отношения к эквивалентному брису.

Коэффициенты пропорциональности в приведенных формулах определяются по нагрузке судна-прототипа.

Ниже приводятся некоторые соотношения, сказанные с выводом формул, приведенных в табл. 12.

Формулы для пересчета веса палуб и главных поперечных переборок базируются на допущении, что эти веса изменяются пропорционально произведению $L^2 B$ и $\beta B H$. Кроме того, предполагается,

что α изменяется пропорционально $L^{\frac{1}{2}}$, а β — пропорционально $L^{\frac{1}{2}}$.

Влияние изменения высоты борта на среднюю толщину листов и поперечное сечение стоек главных поперечных переборок учитывается множителем $H^{\frac{1}{2}}$. В формулу для пересчета веса главных поперечных переборок введен также коэффициент n_p , равный числу этих переборок.

Некоторые, не поддавшиеся анализу веса, относящиеся к металлическому корпусу и не имеющие особого значения в общем балансе нагрузки, объединямы, причем условно предполагается, что они изменяются пропорционально водозаполнению или кубическому модулю. Некоторые другие веса, не зависящие от элементов корабля, например вес шестиков и мачт, рассматриваются как постоянные веса, определяемые отдельным расчетом с учетом размеров шестиков, конструкции мачт и т. п.

При пересчете веса различного рода фундаментов и подкрепляющей представляется уместным исходить из предположения, что они пропорциональны весу соответствующих механизмов и устройств.

Вес деревянных палуб, изоляции палубной, настила полов, конструкция которых не зависит от размеров судна, изменяется пропорционально площади перекрытия. На геометрически подобных судах эти веса относятся как возмноженения (или кубические

Таблица № 1
Переходные формулы для постепенного пересчета веса корушки срезан с произвольной системой заборов.

Наименование конструкций	Переходные формулы
I. Металлический корпус	$\frac{1}{8^3} \frac{L}{D^3} \frac{L}{H}$
Наружная обшивка; заплата и набор двойного дна; набор бортов и дна; набор бортов и дна; установка в общем кильбе; главные продольные переборки	$\frac{1}{8^3} \frac{L}{D^3} \frac{L}{H}$
Главные поперечные переборки	$\frac{1}{8^3} \frac{L}{D^3} \frac{L}{H}$
Палубы и палубы, не участвующие в общем кильбе срезан	$\frac{1}{8^3} \frac{L}{D^3} \frac{L}{H}$
Вспомогательные переборки	$\frac{1}{8^3} \frac{L}{D^3} \frac{L}{H}$
Защитные трубы и дна	$\frac{1}{8^3} \frac{L}{D^3} \frac{L}{H}$
Навстрелки, рубки	$\frac{1}{8^3} \frac{L}{D^3} \frac{L}{H}$
Мостки, мачты	$\frac{1}{8^3} \frac{L}{D^3} \frac{L}{H}$
Прочие	$\frac{1}{8^3} \frac{L}{D^3} \frac{L}{H}$
IV. Поликарбонатная и флуоропластовая	$\frac{1}{8^3} \frac{L}{D^3} \frac{L}{H}$
Фундаменты в водонесущих системах и укреплении	$\frac{1}{8^3} \frac{L}{D^3} \frac{L}{H}$
Полосы металла	$\frac{1}{8^3} \frac{L}{D^3} \frac{L}{H}$
Полосы металла под мачты	$\frac{1}{8^3} \frac{L}{D^3} \frac{L}{H}$
Прочие конструкции	$\frac{1}{8^3} \frac{L}{D^3} \frac{L}{H}$
III. Дольные мачты	$\frac{1}{8^3} \frac{L}{D^3} \frac{L}{H}$
IV. Деревянные части корпуса	$\frac{1}{8^3} \frac{L}{D^3} \frac{L}{H}$
Деревянные части корпуса	$\frac{1}{8^3} \frac{L}{D^3} \frac{L}{H}$
Дерево в настрелках и рубках и др.	$\frac{1}{8^3} \frac{L}{D^3} \frac{L}{H}$
V. Окружка	$\frac{1}{8^3} \frac{L}{D^3} \frac{L}{H}$

Предельные

Наименование конструкций	Переходные формулы
VI. Исходная и покрытия шлюза	$\frac{1}{8^3} \frac{L}{D^3} \frac{L}{H}$
VII. Тканые заплата, мачты в корпусе	$\frac{1}{8^3} \frac{L}{D^3} \frac{L}{H}$
VIII. Оборудование жилых и служебных помещений	$\frac{1}{8^3} \frac{L}{D^3} \frac{L}{H}$
Помещения командного состава	$\frac{1}{8^3} \frac{L}{D^3} \frac{L}{H}$
Старый	$\frac{1}{8^3} \frac{L}{D^3} \frac{L}{H}$
Прочие жилые и служебные помещения	$\frac{1}{8^3} \frac{L}{D^3} \frac{L}{H}$
Оборудование каютных	$\frac{1}{8^3} \frac{L}{D^3} \frac{L}{H}$
Потребности	$\frac{1}{8^3} \frac{L}{D^3} \frac{L}{H}$
IX. Системы	$\frac{1}{8^3} \frac{L}{D^3} \frac{L}{H}$
X. Судовые устройства	$\frac{1}{8^3} \frac{L}{D^3} \frac{L}{H}$
Результат	$\frac{1}{8^3} \frac{L}{D^3} \frac{L}{H}$
Якорное, подвешенное в буксире	$\frac{1}{8^3} \frac{L}{D^3} \frac{L}{H}$
Якорный, установленный	$\frac{1}{8^3} \frac{L}{D^3} \frac{L}{H}$
XI. Оборудование и связь	$\frac{1}{8^3} \frac{L}{D^3} \frac{L}{H}$
XII. Железные трубы в корпусе	$\frac{1}{8^3} \frac{L}{D^3} \frac{L}{H}$

1. По таблице пересчитывается вес корушки, установленной на шлюзе.
2. Формулы, относящиеся к шлюзу, применяются, что для систем в устройстве проектируемого шлюза.
3. По таблице пересчитывается вес мачты.
4. По таблице пересчитывается вес мачты.
5. По таблице пересчитывается вес мачты.
6. По таблице пересчитывается вес мачты.
7. По таблице пересчитывается вес мачты.
8. По таблице пересчитывается вес мачты.
9. По таблице пересчитывается вес мачты.
10. По таблице пересчитывается вес мачты.
11. По таблице пересчитывается вес мачты.
12. По таблице пересчитывается вес мачты.
13. По таблице пересчитывается вес мачты.
14. По таблице пересчитывается вес мачты.
15. По таблице пересчитывается вес мачты.
16. По таблице пересчитывается вес мачты.
17. По таблице пересчитывается вес мачты.
18. По таблице пересчитывается вес мачты.
19. По таблице пересчитывается вес мачты.
20. По таблице пересчитывается вес мачты.
21. По таблице пересчитывается вес мачты.
22. По таблице пересчитывается вес мачты.
23. По таблице пересчитывается вес мачты.
24. По таблице пересчитывается вес мачты.
25. По таблице пересчитывается вес мачты.
26. По таблице пересчитывается вес мачты.
27. По таблице пересчитывается вес мачты.
28. По таблице пересчитывается вес мачты.
29. По таблице пересчитывается вес мачты.
30. По таблице пересчитывается вес мачты.
31. По таблице пересчитывается вес мачты.
32. По таблице пересчитывается вес мачты.
33. По таблице пересчитывается вес мачты.
34. По таблице пересчитывается вес мачты.
35. По таблице пересчитывается вес мачты.
36. По таблице пересчитывается вес мачты.
37. По таблице пересчитывается вес мачты.
38. По таблице пересчитывается вес мачты.
39. По таблице пересчитывается вес мачты.
40. По таблице пересчитывается вес мачты.
41. По таблице пересчитывается вес мачты.
42. По таблице пересчитывается вес мачты.
43. По таблице пересчитывается вес мачты.
44. По таблице пересчитывается вес мачты.
45. По таблице пересчитывается вес мачты.
46. По таблице пересчитывается вес мачты.
47. По таблице пересчитывается вес мачты.
48. По таблице пересчитывается вес мачты.
49. По таблице пересчитывается вес мачты.
50. По таблице пересчитывается вес мачты.
51. По таблице пересчитывается вес мачты.
52. По таблице пересчитывается вес мачты.
53. По таблице пересчитывается вес мачты.
54. По таблице пересчитывается вес мачты.
55. По таблице пересчитывается вес мачты.
56. По таблице пересчитывается вес мачты.
57. По таблице пересчитывается вес мачты.
58. По таблице пересчитывается вес мачты.
59. По таблице пересчитывается вес мачты.
60. По таблице пересчитывается вес мачты.
61. По таблице пересчитывается вес мачты.
62. По таблице пересчитывается вес мачты.
63. По таблице пересчитывается вес мачты.
64. По таблице пересчитывается вес мачты.
65. По таблице пересчитывается вес мачты.
66. По таблице пересчитывается вес мачты.
67. По таблице пересчитывается вес мачты.
68. По таблице пересчитывается вес мачты.
69. По таблице пересчитывается вес мачты.
70. По таблице пересчитывается вес мачты.
71. По таблице пересчитывается вес мачты.
72. По таблице пересчитывается вес мачты.
73. По таблице пересчитывается вес мачты.
74. По таблице пересчитывается вес мачты.
75. По таблице пересчитывается вес мачты.
76. По таблице пересчитывается вес мачты.
77. По таблице пересчитывается вес мачты.
78. По таблице пересчитывается вес мачты.
79. По таблице пересчитывается вес мачты.
80. По таблице пересчитывается вес мачты.
81. По таблице пересчитывается вес мачты.
82. По таблице пересчитывается вес мачты.
83. По таблице пересчитывается вес мачты.
84. По таблице пересчитывается вес мачты.
85. По таблице пересчитывается вес мачты.
86. По таблице пересчитывается вес мачты.
87. По таблице пересчитывается вес мачты.
88. По таблице пересчитывается вес мачты.
89. По таблице пересчитывается вес мачты.
90. По таблице пересчитывается вес мачты.
91. По таблице пересчитывается вес мачты.
92. По таблице пересчитывается вес мачты.
93. По таблице пересчитывается вес мачты.
94. По таблице пересчитывается вес мачты.
95. По таблице пересчитывается вес мачты.
96. По таблице пересчитывается вес мачты.
97. По таблице пересчитывается вес мачты.
98. По таблице пересчитывается вес мачты.
99. По таблице пересчитывается вес мачты.
100. По таблице пересчитывается вес мачты.

модуля) в степенях две трети. То же относится и к весу окраски. Это дает основание считать, что и в общем случае перечисленные веса изменятся приблизительно пропорционально тем же параметрам.

Вес оборудования молков и хозяйственных помещений естественно пересчитывать по численности команды, как это и принято в рассматриваемой таблице.

При пересчете веса устройств можно считать, что вес рулевого устройства пропорционален мощности рулевой машины, а мощность рулевой машины извлекается пропорционально длине судна, осадке и квадрату скорости. Суммарный вес якорного, швартового и буксирного устройств приблизительно пропорционален весу стенового якоря. Вес последнего практически пропорционален площади модели-шпангоута, в соответствии с чем можно пересчитывать рассматриваемый комплекс весов пропорционально произведению из ширины корабля и осадки с учетом или без учета влияния коэффициента подвеса модели-шпангоута.

Вес электрооборудования правального всего пересчитывать пропорционально мощности электростанции. Если эти данные еще отсутствуют, вес электрооборудования обычно пересчитывается пропорционально водоизмещению или произведению LBN .

Система формул, приведенная в табл. 10, как и любая другая аналогичная система, имеет в известной мере условный характер, так как невозможно охватить одним способом пересчета все многообразие возможных на практике случаев. Естественно, например, что соответствующие измерители весов должны быть откорректированы, если на проектируемом судне, по сравнению с прототипом, предполагается относительно увеличить прочность киля, либо частей набора или повысить качество изоляции помещений, или усилить эффективность вентиляции и т. п. Если на проектируемом судне предполагается сохранить какие-либо конструкции прототипа, например конструкции мачт с рангоутами, мостками, надстроек, то соответствующие веса заимствуются непосредственно из натурных корабля-прототипа. В противном случае необходимо учесть изменение протяженности надстроек, высоты мачт и т. п. Равным образом необходимо учесть некоторые изменения в характере обводов (например, увеличение или уменьшение развала бортов) и т. п.

Таким образом, в каждом частном случае таблица переходных множителей должна быть соответствующим образом откорректирована.

Переходя к рассмотрению судов с набором по правилам Регистра Союза ССР, надо прежде всего отметить, что приведенные выше формулы, относящиеся к оборудованию судна, могут применяться для них со следующими изменениями.

Общий вес якорного, швартового и буксирного устройств следует считать пропорциональным весу якорного устройства

и определять по последнему переходный коэффициент в соответствии с правилами Регистра.

Вес систем могут быть пересчитаны пропорционально квадратичному модулю.

На пассажирских судах вес оборудования пассажирских помещений, включая пассажирские каюта, известно пересчитывать пропорционально числу пассажиров.

Для пересчета же составляющих веса стали пользоваться формулами, приведенными в настоящем параграфе, целесообразно вследствие отмеченных ранее затруднений. Поэтому можно рекомендовать определять вес стали для судов рассматриваемого типа либо по материалам, отнесенным ко второй группе, либо путем непосредственного пересчета по прототипу на основе правил Регистра.

При таком пересчете целесообразно набирать для проектируемого судна и судна-прототипа продольные и поперечные связи по модельному сечению. После этого нетрудно определить вес этих связей, отнесенный к одной изданию, а затем к одному метру длины судна в районе модели, не учитывая веса поперечных переборок, коридоров гротых валов, надстроек и рубок.

Пусть вес стали, подсчитанный таким путем, равен p (кг/м) для проектируемого судна и p_0 (кг/м) — для прототипа. Тогда для пересчета веса основного стального корпуса P можно воспользоваться формулой

$$P = P_0 \frac{p}{p_0} \left(\frac{b}{b_0} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{L}{L_0},$$

где P_0 — аналогичный вес, соответствующий прототипу.

Вес главных поперечных переборок может быть подсчитан и в настоящем случае по формуле, приведенной в табл. 10, с учетом числа переборок на прототипе и проектируемом судне. С другой стороны, влияние размеров судна на толщину листов и размеры стоек переборок может быть учтено также по правилам Регистра Союза ССР. Если вес основного стального корпуса прототипа P_0 определяется без учета влияния надстроек, то «условный» вес надстроек может высчитываться по формулам В. А. Соколя, приведенным в § 6. По его же формулам могут пересчитываться веса коридоров гротых валов и фальшборта.

Предлагаемый выше способ пересчета веса стали по прототипу на основе правил Регистра с использованием некоторых приближенных соотношений отличается большой точностью.

§ 6. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ВЕСА КОРПУСА

Подводя итог сказанному в предыдущих параграфах, можно отметить, что формулы для определения веса корпуса, которые были отнесены к первой группе, могут успешно применяться для подсчета

в первом приближении вес корпуса судна любого типа, если имеется подходящий прототип. Для более точного определения вес корпуса судов с проальной системой набора, сконструированного по расчету, целесообразно применять совместно формулы третьей и четвертой групп, как это изложено в § 8. Для уточненных расчетов вес корпуса судов с набором по правилам Регистра Союза ССР рационально либо применять совместно формулы второй и четвертой групп либо, не прибегая к формулам второй группы, воспользоваться приемом, изложенным в предыдущем параграфе.

При определении по прототипу необходимых измерителей нужно учитывать приведенные ниже данные о влиянии различных факторов на вес корпуса.

Замена клепаных конструкций сварными приводит к снижению веса стали в составе корпуса примерно на 15%.

Применение ледовых подкреплений сопряжено с увеличением веса стального корпуса, которое выражается приблизительно следующими цифрами в процентах:

Подкрепления класса «А»	2—3
» » » «В»	10—12

Более эффективные ледовые подкрепления судов, предназначенных для самостоятельного плавания в Арктике в ледовых условиях, увеличивают вес стального корпуса на 15—20%.

Нормальные подкрепления рудовозов увеличивают вес стали примерно на 6%.

Для снижения веса корпуса в отечественной практике в качестве материала корпусных конструкций широко применяются стали повышенного сопротивления. При их использовании максимальная весовая экономия может быть достигнута в тех случаях, когда механические качества стали полностью используются в крайних фибрах эквивалентного бруса. Необходимость обеспечить устойчивость связей может явиться фактором, ограничивающим допустимое уменьшение толщины материала. Так же сказываются запасы по толщине связей, которые вносятся для компенсации коррозии и износа. Последнее обстоятельство сказывается сильнее на малых судах, вследствие чего весовая экономия от применения стали повышенного сопротивления уменьшается с уменьшением длины судна.

В качестве материала для корпусов сухогрузных судов и танкеров в сварной конструкции [48] рекомендуются стали со следующими пределами текучести σ_s , кг/см².

Длина судна, м	σ_s
До 80	2400
80—100	2400—3000
100—180	3000—3500
Более 180	4000

Для танкеров

Длина судна, м	σ_s
До 100	2400
100—150	2400—3000
150—180	3000—3500
Более 180	4000

Там же приведены следующие формулы для определения отношения веса корпуса $P_{ст}^{(2)}$, выполненного из стали повышенного сопротивления, к весу корпуса $P_{ст}^{(1)}$ из обычной стали в зависимости от отношения предела текучести обычной стали $\sigma_s^{(1)}$ к пределу текучести стали повышенного сопротивления $\sigma_s^{(2)}$.
При $L = 80—100$ м

$$\frac{P_{ст}^{(2)}}{P_{ст}^{(1)}} = 0,25 \left[1 + 3 \left[\left(\frac{\sigma_s^{(1)}}{\sigma_s^{(2)}} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right],$$

при $L > 150$ м

$$\frac{P_{ст}^{(2)}}{P_{ст}^{(1)}} = 0,5 \left[\left(\frac{\sigma_s^{(1)}}{\sigma_s^{(2)}} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \left[1 + \left[\left(\frac{\sigma_s^{(1)}}{\sigma_s^{(2)}} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right].$$

Легкие сплавы широко применяют в качестве материала корпуса небольших катеров. На более крупных судах их используют для изготовления надстроек, дымовых труб, предметов оборудования помещений и некоторых устройств. В этом случае применение легких сплавов наряду с уменьшением веса корпуса снижает его жесткость, что позволяет уменьшать отношение ширины судна к осадке и улучшать его мореходные качества. В качестве опыта из легкого сплава были изготовлены корпуса небольшого речного катера и американской подводной лодки. Вопрос об использовании легких сплавов в корпусах крупных транспортных судов был рассмотрен в некоторых исследовательских проектах и работах.

В отечественной практике применяются алюминий-магнелиевые сплавы АМг-5б с пределом текучести $\sigma_{0,2} = 1300$ кг/см² и АМг-6т — с пределом текучести $\sigma_{0,2} = 1600$ кг/см². Удельный вес сплавов ($\gamma_{сп} = 2,65$ т/м³) приблизительно в три раза меньше удельного веса стали.

Весовая экономия от применения легких сплавов возрастает с увеличением предела текучести сплава и уменьшением предела текучести стали. Отношение веса корпуса из легких сплавов $P_{сп}$ к весу стального корпуса $P_{ст}$ может быть определено в первом приближении по формуле [48]

$$\frac{P_{сп}}{P_{ст}} = 0,14 \left(\frac{\sigma_{ст}}{\sigma_{сп}} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\left(\frac{\sigma_{ст}}{\sigma_{сп}} \right)^{\frac{1}{2}} + 1,65 \right].$$

Судя по приведенной формуле, сплав с пределом текучести $\sigma_{\text{ст}} = 1600 \text{ ккал/см}^2$ позволяет облегчить корпус судов из стали с пределом текучести $\sigma_{\text{ст}} = 2200 \text{ ккал/см}^2$ и $\sigma_{\text{ст}} = 4000 \text{ ккал/см}^2$ соответственно на 50 и 33%.

Из изложенного следует, что применение легких сплавов приводит к большому выигрышу в весе корпуса, если их используют для небольших судов, которые строят из стали с меньшим пределом текучести. В тех случаях, когда механические качества стали в составе корпуса не используются в полной мере, что наблюдается на малых судах, вес корпуса может быть снижен дозначительно.

В связи с изложенным следует отметить, что приведенная выше формула для определения весовой экономии от применения легких сплавов составлена применительно к судну с средними размерами. Вопрос о зависимости рассматриваемого изменения веса корпуса от длины судна был исследован Б. Н. Смоляновым [45]. Он пришел к выводу, что применение легких сплавов взамен стали Ст. 3 для постройки корпусов военных грузовых судов позволяет снизить их вес на 40—50% при $\sigma_{\text{ст}} = 1300 \text{ ккал/см}^2$ и на 55—65% — при $\sigma_{\text{ст}} = 3000 \text{ ккал/см}^2$. Наимее из этих пределов относится к судам длиной 120 м, а высшие — к судам длиной 40 м. Таким образом уменьшение длины судна в этих пределах способно увеличить весовую экономию от применения легких сплавов на 20—25%, в то время как экономия экономии от применения стали повышенного сопротивления уменьшается при уменьшении длины судна.

Настройки из легких сплавов легче стальных на 50—60%. В приведенных выше формулах для подсчета веса металлического корпуса при переходе на другую марку стали или применения легких сплавов принят в качестве основного показателя механических качеств материала — предел текучести. В настоящее время намечается тенденция исходить в подобных подсчетах не из предела текучести, а из временного сопротивления металла.

Остановимся в заключение на вопросе о подсчете веса корпуса при определении элементов проектируемого судна в ряде вариантов. В этом случае рационально применять наиболее точные способы подсчета веса, рассмотренные выше. Необходимо, однако, учесть, что теперь речь идет об изменении нагрузки исходного варианта проекта, являющихся следствием закономерных изменений соотношений главных размеров судов и коэффициентов теоретического чертежа при неизменных заданных показателях судна. Это обстоятельство приводит к необходимости внести некоторые изменения в приведенные ранее указания, поскольку многие веса становятся теперь независимыми от элементов судна.

Рассмотрим под этим углом зрения элементы нагрузки, входящие в раздел «Корпус».

Весы, связанные с металлическим корпусом, должны быть отнесены в настоящем случае к переменным весам, за исключением веса

рубков, мостиков и мачт, которые, естественно, переходят в категорию постоянных весов.

Разным образом, и вес всех подкреплений, за исключением подкреплений под главные и вспомогательные механизмы, должен рассматриваться как постоянный вес. То же относится и к весу оборудования помещений, а также к весу дельных вещей, за исключением веса якорного и яхтового устройств. Для упрощения расчетов допустимо не выделять вес двух последних устройств и рассматривать его как постоянный вес.

Весы изоляции помещений и покрытия полов могут изменяться при карьеровании элементов судна различным образом, в зависимости от длины и ширины отдельных отсеков, а также высоты междупалубных пространств. В соответствии с этим для конкретизации функциональных зависимостей, выражающих эти веса, желательно внести дополнительные уточнения в постановку задачи. В противном случае эти веса могут пересчитываться так, как это указано в табл. 10.

В группе судовых устройств вес рулевого и якорного устройств должен рассматриваться как переменный, а вес остальных устройств (грузового и шлюпочного) — как постоянный. Вес якорей и якорных цепей, соответствующий сопоставляемым вариантам судна, может быть легко определен по соответствующим правилам. Приближенно можно принять, что общий вес якорного, швартового и буксирного устройств изменяется пропорционально суммарному весу якорей и цепей. Весы во группе «Самое и управление» должны рассматриваться как постоянные.

Из изложенного следует, что в рассматриваемом случае большая часть весов, относящихся к металлическому корпусу, остается в рубрике переменных весов. Значительная же часть остальных весов в разделе «Корпус» переходит в раздел постоянных весов.

Остается добавить, что для сокращения объема расчетов целесообразно при применении табл. 10 объединить веса конструкций, которые выражаются одинаковыми функциональными зависимостями.

§ 10. ИЗМЕРЕНИЕ ВЕСА БРОНИРОВАНИЯ

Для кораблей, геометрически подобных по форме, главным размерениям и расположению бронирования, вес брони изменяется пропорционально ее толщине и водоизмещению корабля и степени дельте. Эта зависимость может быть принята в качестве приближенной и в случае, когда корабль геометрически не вполне подобен, что приводит к формуле

$$P_b = \rho_b D^{\frac{3}{2}}, \quad (30)$$

где λ — коэффициент, характеризующий среднюю толщину бронирования.

Толщина δ введена в формулу (30) для того, чтобы дать четкое представление о физическом смысле этой формулы. В практических пересчетах нет необходимости вычислять отдельно ρ_δ и δ . Проще сразу же определять произведение $\rho_\delta \delta$. Наиболее простой способ определения этого произведения заключается в исправлении веса бронирования и нагрузке корабля-прототипа в предположении, что его элементы остаются неизменными, а толщины брони изменяются в соответствии со схемой, принятой для проектируемого корабля. После определения исправленного веса искомый измеритель найдется по формуле

$$\rho_\delta \delta = (\rho_\delta \delta)_0 = \frac{(P_\delta)_0}{D_0^{\frac{2}{3}}} \quad (31)$$

Вес броневых рубок, труб подпалы, барбетов не связан непосредственно с размерами корабля. Поэтому может оказаться целесообразным выдвинуть этот вес из общего веса бронирования, оценивая его как постоянное слагаемое P_p в формуле

$$P_\delta = \rho_\delta' \delta' D^{\frac{2}{3}} + P_p$$

Можно также пользоваться формулой

$$P_\delta = \rho_\delta' \delta' D^{\frac{2}{3}} + \rho_\delta' \delta' A D^{\frac{1}{3}},$$

где A — высота броневых поясов. Второе слагаемое в правой части равенства относится к вертикальному бронированию.

Более точные результаты можно получить, выражая вес бронирования через главные размерения корабля, для чего целесообразно разбить его на следующие группы:

$P_{\delta\alpha}$ — вес вертикального бронирования, за исключением поперечных и продольных переборок (бортовая броня и траверзы);

$P_{\delta\beta}$ — вес горизонтального бронирования (палубы и скусы);

$P_{\delta\gamma}$ — вес броневых продольных переборок;

$P_{\delta\delta}$ — вес броневых поперечных переборок;

$P_{\delta\epsilon}$ — вес местного бронирования, кроме бронирования рубок, труб подпалы, барбетов (броня выгородок, котельных и машинных шахт, дымоходов и пр.);

P_p — вес броневых рубок, труб подпалы, барбетов;

$P_{\delta\theta}$ — вес крепления брони.

Для определения отдельных весов можно воспользоваться следующими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} P_{\delta\alpha} &= g_1 \delta_1 h (L + B); \\ P_{\delta\beta} &= g_2 \delta_2 L B; \\ P_{\delta\gamma} &= g_3 \delta_3 L H; \\ P_{\delta\delta} &= g_4 \delta_4 B H; \\ P_{\delta\epsilon} &= g_5 \delta_5 D^{\frac{2}{3}}; \\ P_p &= \text{const}; \\ P_{\delta\theta} &= g_6 \sum (P_{\delta})_i \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

Вес вертикального бронирования можно также пересчитывать по формуле

$$P_{\delta\alpha} = g_1' \delta_1' h (2L + B), \quad (33)$$

учитывая, что вес бортовой брони влияет на эту статью нагрузки в большей степени, чем вес броневых траверзов.

В пределах каждого вида бронирования наибольшее полезное значение в весовом отношении имеет обычно броня максимальной толщины. Поэтому, если вес бронирования разбит на несколько укрупненных весов, причем каждый вес охватывает броню нескольких толщин, то при определении измерителей обычно оказывается возможным принять в качестве характерных толщин $(\delta)_0$ и δ_0 наибольшие цифры в пределах каждой группы. Так, например, для расчета веса вертикального бронирования целесообразно исходить из толщины главного броневых поясов. Для расчета веса горизонтального бронирования лучше исходить не из толщины главной броневой палубы, а из суммарной толщины палуб.

Независимо от этого формулы (32) и (33) могут быть применены и при более детальной разбивке весов, например для отдельных палуб и для каждого пояса вертикальной брони и отдельно. Вес крепления брони проще всего учесть процентной надбавкой к полному весу бронирования.

Часто вес бронирования разбивают на полный вес вертикального бронирования $P_{\delta\alpha} + P_{\delta\gamma} + P_{\delta\theta}$, вес горизонтальной брони $P_{\delta\beta}$ и вес местного бронирования $P_{\delta\epsilon} + P_p + P_{\delta\theta}$.

В справочнике [47] приводятся данные по соотношениям веса отдельных видов бронирования. Эти материалы приводят к выводу, что независимо от класса корабля веса бронирования выражаются приблизительно следующими цифрами (в процентах от полного веса бронирования)

Вертикальное бронирование	30—45
Горизонтальное	45—50
Местное	15—20

К разделу нагрузок «Механизмы», кроме главных механизмов, обслуживающих их вспомогательных механизмов и машинных трубопроводов, мы будем относить расходные цистерны, баллоны сжатого воздуха, кисти управления, палоромовы и гребные винты, дымоводы до верней палубы, меду в котлах, теплые ящики, трубопроводы и трюмы машинных отделений, а также расположенные в пределах машинных отделений площадки, трапы и полы.

При определении элементов проектируемого судна принято считать, что вес механизмов пропорционален их мощности.

Измеритель p_m в формуле

$$P_m = p_m N \quad (34)$$

обычно называют удельным весом механизмов. В дальнейшем мы будем относить его к полной мощности механизмов при спецификационном числе оборотов.

Из практических данных, приведенных ранее, следует, что величина измерителя p_m колеблется в широких пределах в зависимости от типа и характеристик главных и вспомогательных механизмов. Что же касается одноклассных механизмов, то измеритель p_m оказывается сравнительно стабильным лишь при сопоставлении наиболее легких машинных установок, в которых использованы все возможности для максимального снижения их веса. Такие установки применяются в основном лишь на военных кораблях и спортивных судах. Значительные колебания измерителя p_m в других случаях не вызывают особых затруднений, так как при проектировании судна ориентируются на определенное число реальных главных и вспомогательных механизмов. Поэтому формулой (34) приходится чаще всего пользоваться в первоначальных приближениях, когда мощность машинной установки еще не уточнена. В дальнейших приближениях вес машинной установки переходит в категорию постоянных весов.

Сравнительно редко при проектировании судна ставится вопрос о проектировании новых механизмов. В подобных случаях после уточнения пределов возможного изменения мощности механизмов ожидаемый вес машинной установки определяется особенно подробными расчетами.

Потребность в уточнении формулы (34) возникает также и при определении элементов судна в ряде вариантов. В этом случае мощность механизмов рассматривают в большинстве случаев как один из критериев для сравнительной оценки вариантов, причем условно считают, что, изменяясь непрерывно, она может принимать любые значения, вытекающие из расчета².

² В качестве критерия при сопоставлении вариантов может быть принята также скорость хода, если мощность механизмов рассматривается как величина постоянная.

При проектировании гражданских судов, снабженных турбозубчатыми агрегатами с мощностью $N = 3000-15000$ л.с., в качестве зависимости, которая лучше отражает действительные соотношения, чем равенство (34), можно предложить формулу

$$P_m = p'_m N^{\frac{2}{3}}$$

где приблизительно

$$p'_m = 1500 \frac{\text{кг}}{(\text{л.с.})^{\frac{2}{3}}}$$

если машинное отделение расположено в средней части судна.

Анализ весовых соотношений ко дизельным установкам приводит к очень пестрым цифрам. В этом случае измеритель p_m в формуле (34) зависит от типа главных дизелей (двухтактные, четырехтактные, простого и двойного действия), их конструктивных особенностей, числа оборотов гребного вала, комплектации вспомогательных механизмов и т.п. Исходя из таблиц нагрузок построенных судов и практических данных, приведенных в курсах проектирования судов, можно в среднем оценить измеритель следующими цифрами.

Для гражданских судов, снабженных налоборотными дизелями с непосредственной передачей на гребные винты,

$$p_m = 80-110 \text{ кг/л.с.}$$

Если используются сравнительно высокооборотные дизельные установки с непосредственной передачей на гребные винты при числе оборотов гребного вала порядка 300 в мин., удельный вес механизмов снижается приблизительно до

$$p_m = 60-70 \text{ кг/л.с.}$$

Для дизель-электрических и дизель-редукторных установок измеритель p_m лежит большей частью в пределах

$$p_m = 60-90 \text{ кг/л.с.}$$

Часто вес рассматриваемых установок оценивают приблизительно по весу главных дизелей, принимая

$$P_m = k P_{\text{диз.}}$$

В курсе [1] приведены следующие значения коэффициента пропорциональности в этой формуле: $k = 1,85$ — для установок с четырехтактными дизелями; если в качестве главных двигателей используются двухтактные дизели простого или двойного действия, $k = 2,0$ и $k = 2,2$ соответственно. По некоторым отечественным быстроходным установкам ($n = 300$) рассматриваемый коэффициент оказался в среднем равным $k = 1,5$.

Силовые установки с паровыми поршневыми машинами применяются в настоящее время редко. Отметим все же, что удельный

вес таких установок возрастает по мере убывания их мощности. В среднем в интервале от $N = 2000$ и. л. с. до $N = 500$ и. л. с. (индикаторных лошадиных сил) при числе оборотов коленчатого вала порядка 100 (об/мин) измеритель P_m выражается соответственно цифрами

$$P_m = 130 - 160 \text{ кг/и. л. с.}$$

Эти цифры относятся к установкам с водотрубными котлами, расположенными в средней части судна. При цилиндрических же котлах

$$P_m = 200 - 230 \text{ кг/и. л. с.}$$

В курсе [1] приведены таблицы, предназначенные для приближенной оценки значения числа оборотов главных механизмов на вес машинной установки. Табличные данные могут быть выражены приблизительно формулами

$$P_m = (P_{m0}) \left(\frac{N}{N_0} \right)^{\frac{2}{3}}$$

для дизельных установок и

$$P_m = (P_{m0}) \left(\frac{N}{N_0} \right)^{\frac{1}{4}}$$

для установок с паровыми поршневыми машинами.

Если силовая установка расположена в кормовой части судна, вес ее снижается на 5—10% за счет уменьшения длины валопровода. Сказанное относится как к дизельным установкам, так и к установкам с паровыми турбинами или паровыми поршневыми машинами.

Дополнительные данные о весе механизмов можно найти в работе [6].

§ 12. ИЗМЕРИТЕЛИ ВЕСА ТОПЛИВА, ВОДЫ И НАСЛА

Вес, соответствующий рассматриваемому разделу нагрузки

$$P_s = P'_s + P''_s + P'''_s,$$

объединяет вес топлива P'_s , вес питательной воды P''_s и вес смазочного масла P'''_s . При выборе функциональных зависимостей, связывающих вес P_s с элементами судна, удобно учитывать отдельно каждую из перечисленных составляющих этого веса.

При заданной скорости хода в запас топлива определяется оголовной в заданных дальностью плавания в милях L или продолжительностью ходового времени и рейса в часах τ и часовым расходом топлива.

Предполагается, что расход топлива пропорционален мощности механизмов N , и, таким образом,

$$P'_s = k P'_{s0} N = k P'_{s0} \frac{v}{v_0} N, \quad (35)$$

если дальность плавания задается по полной скорости хода на испытаниях, или

$$P'_s = k P'_{s0} \frac{v_0}{v} N_s = k P'_{s0} \frac{v_0}{v_s} N_s \quad (36)$$

если дальность плавания задается по экономической скорости хода.

В формулах (35) и (36) весовые измерители P'_s и P'_{s0} выражают удельный расход топлива на одну и. л. с. в час при полной мощности механизмов и мощности, соответствующей экономическому ходу. Коэффициент k учитывает необходимый запас на стоянки и непредвиденные задержки в пути вследствие штормовой погоды (морской запас), если соответствующий надбавка не введена непосредственно в заданную дальность плавания.

Для военных кораблей обычно принимают $k = 1,0$, а для транспортных судов $k = 1,30$, — если формула (35) отнесена к сдаточной скорости на испытаниях, и $k = 1,15$, — если она отнесена к средней (эксплуатационной) скорости хода, возмуженной с учетом обстранина корпуса и влияния ветра и волн. При оценке этих цифр следует иметь в виду, что в среднем эксплуатационная скорость судна меньше скорости на испытаниях на 5—6%, если не допускается чрезмерное обстранивание наружной обшивки. По отдельным рейсам скорость может уменьшаться и значительно больше.

При проектировании военных кораблей дальность плавания задается обычно по экономической скорости хода.

С технической точки зрения экономическая скорость хода корабля есть скорость, соответствующая максимальной дальности плавания. Рассматривая вопрос в несколько другой интерпретации, можно также сказать, что экономическая скорость — это скорость, при которой заданная дальность плавания обеспечивается с минимальным запасом топлива. Для того, чтобы этот термин имел вполне определенный смысл, необходимо оговорить число работающих котлов и другие обстоятельства, оказывающие влияние на удельный расход топлива.

Допустим, что мощность, развиваемая данной машинной установкой, приблизительно пропорциональна кубу скорости и, следовательно,

$$N = K v^3,$$

где $K = f(v)$ — численный коэффициент. Тогда на основании формулы (36) при $k = 1,0$

$$P'_s = K P'_{s0} v^3.$$

Если бы удельный расход топлива P'_0 был величиной постоянной, то при заданной дальности плавания запас топлива выражался бы квадратичной параболой. В действительности, однако, измеритель P'_0 при мощностях меньших и больших нормальной мощности для данной установки — возрастает. Поэтому кривая, выражающая необходимый запас топлива P'_0 в функции скорости, имеет минимум. Этот минимум, соответствующий экономической скорости, определяется частично также законом изменения коэффициента K . Экономическая скорость судов с турбоустановками обычно лежит в интервале скоростей, равных 25—40% от полной скорости. При дизельных установках измеритель P'_0 более стабилен, вследствие чего минимум кривой $P'_0 = f(v)$ соответствует очень малым скоростям. Поэтому при проектировании судов с подобными машинными установками понятие об экономической скорости хода, в технической интерпретации этого термина, не имеет практического значения.

В тактико-технических заданиях этому термину обычно придается чисто оперативный смысл и рассматривают экономическую скорость как заданную величину, исходя из которой рассчитывается запас топлива, соответствующий гарантийной дальности плавания. В этих случаях экономическая скорость хода может и не соответствовать минимальному запасу топлива (для максимальной дальности плавания).

При определении элементов проектируемого судна независимо от того, задается ли район плавания в функции полной или экономической скорости хода, измеритель P'_0 обычно относят к полному расходу топлива, который дается с учетом общесудовых нужд, в частности, расхода топлива на освещение и отопление помещений трюмов и действие камбуза, бани, прачечной и т. п. Такая практика целесообразна, поскольку расход топлива на эти вспомогательные нужды обычно не превышает 10—15% от полного расхода топлива.

На пассажирских судах с большим числом пассажиров целесообразно учитывать отдельно расход топлива на отопление и освещение пассажирских помещений. То же относится к учету работы рефрижераторных машин на грузовых судах с рефрижераторными трюмами и промышленного оборудования на промышленных судах. Также целесообразно учитывать отдельно расход топлива на подогрев тяжелых нефтепродуктов на нефтеналивных судах.

Поскольку все эти составляющие общего запаса топлива не зависят от мощности механизмов, их следует вводить в общие функциональные зависимости в виде дополнительных постоянных слагаемых, не влияющих на величину измерителя P'_0 и подсчитывать P'_0 по формуле

$$P'_0 = kP'_0 N + \text{const.}$$

Отметим в качестве примера, что на трехваловых расходах топлива на рефрижераторные, промышленные и вспомогательные механизмы может достигать 40—50% от расхода топлива на главные двигатели.

При паровых машинных установках удельный расход топлива зависит от его теплотворной способности, давления и температуры пара, температуры воздуха, подаваемого в топку котла, температуры охлаждающей воды и холодильных и принципиальной схемы трубопроводов. Кроме того, при любом типе машинной установки удельный расход топлива зависит от комплексации вспомогательных механизмов. Эти обстоятельства обуславливают довольно значительные колебания измерителя P'_0 на паровых судах.

При определении измерителя P'_0 рассматриваемых судов по методу можно считать, что при всех прочих одинаковых условиях он изменяется обратно пропорционально теплотворной способности топлива Q . Иногда при подобных пересчетах необходимо учесть также коэффициенты полезного действия котлов на судне-прототипе и проектируемом судне. В подобных случаях формула пересчета принимает вид

$$P'_0 = (P'_0)_0 \frac{Q_0}{Q} \frac{\eta_0}{\eta},$$

где η и η_0 — коэффициенты полезного действия котлов. Уместно отметить, что при пересчете из установок с водотрубными котлами, работающими на нефти, к установкам с цилиндрическими котлами на угольном отоплении $\frac{\eta_0}{\eta} = 1,10 - 1,15$.

Условная теплотворная способность котельного топлива обычно принимается равной 9870 или 10000 ккал/кг, а угля — 6000—7000 ккал/кг.

В первоначальных расчетах, связанных с проектированием гражданских судов, снабженных турбоустановками паровыми установками и котлами с мазутным отоплением, можно предложить для определения удельного расхода топлива эмпирическую формулу

$$P'_0 = 0,230 + \frac{300}{N} \text{ кг/л. с.-ч.}$$

Пределы применимости формулы $N = 8000 - 25000$ л. с. Она выведена для установок с давлением пара в 45 атм при температуре 470° С и теплотворной способности топлива 9870 ккал/кг. Предполагается, что воздух и вода подаются к котлам водогретами. Расход топлива дается с учетом всех нужд применительно к электрифицированным судам с вспомогательными механизмами.

Для установок с давлением пара в 29 атм удельный расход топлива возрастает приблизительно на 12—15 л/л. с.-ч. Путем увеличения давления пара до 50 атм и усложнения тепловой схемы можно снизить расход топлива на 15—20 л/л. с.-ч.

Аналогичная формула для судовых силовых установок с паровыми поршневыми машинами и водотрубными котлами и нефтяным отоплением имеет вид

$$p'_t = 0,42 + \frac{100}{N} \text{ кг/д. с. ч.}$$

В данном случае коэффициент p'_t отнесен к одной индикаторной лошадиной силе. Пределы применимости формулы $N = 500-4000$ л. с. Формула дается для установок с минимальным тройным расширением и водотрубными котлами с нефтяным отоплением. Давление пара принято равным 16 атм при температуре 330°C . Предполагается, что вода и воздух подается к котлам под давлением. При работе установок на насыщенном паре расход топлива возрастает на 15-20%.

Если в подобной установке используется утилизационная турбина, расход топлива снижается примерно на 25-30%.

Дизели, устанавливаемые в качестве главных судовых двигателей, потребляют на одну эффективную лошадиную силу 0,100-0,175 кг дизельного топлива в час. В соответствии с этим расход топлива на все нужды может быть принят равным

$$p'_t = 0,18 - 0,19 \text{ кг/д. с. ч.}$$

Если дизели работают на тяжелом топливе, численное значение коэффициента p'_t возрастает примерно на 10%.

После выбора главных и вспомогательных механизмов запас топлива на судах с турбинами и паровыми поршневыми механизмами подсчитывают детально исходя из суммарного расхода пара g на все нужды за рейс. Аналогично подсчитывают запас котельного топлива на дизельных судах. Расчет основан на следующем соотношении между расходом топлива и расходом пара:

$$p'_t = g \frac{i_2 - i_3}{q_3} \quad (37)$$

где i_2 , i_3 — теплосодержание пара и питательной воды;

Q — теплотворная способность топлива;

q_3 — коэффициент полезного действия котла.

Величины i_2 и i_3 определяются по справочным таблицам в зависимости от параметров пара.

Формулой (37) можно пользоваться также для определения отдельных составляющих запаса топлива, например запаса топлива, необходимого для отопления пассажирских помещений на пассажирских судах или подогрева нефтепродуктов на танкерах. Используемые в ней данные по расходу пара необходимы для определения производительности котельных установок.

Дополнительные запасы топлива на отопление пассажирских помещений в первом приближении кроме всего перечислить по пропорции, принимая, что этот вес или соответствующий ему расход

пара пропорционален числу пассажиров, перевозимых судном. Можно также исходить из кубатуры пассажирских помещений, пересчитывая пропорционально числу пассажиров, определяя соответствующую ей потерю тепла через ограждающие поверхности.

В стадии определения элементов проектируемого судна при подсчете запаса топлива, расходуемого на подогрев тяжелых нефтепродуктов, перевозимых наливом, можно пользоваться теми же формулами, которые применяются при аналогичном подробном расчете. Он сводится к определению количества тепла, которое расходуется на подогрев нефтепродуктов и на пополнение потерь, связанных с переходом тепла в воду и воздух через наружную обшивку, палубы и переборки. Необходимые для этого формулы можно найти в курсах судовых систем, а исходные данные для расчета фигурируют обычно в технических заданиях на проектирование судна. Однако в начальной стадии разработки проекта судна коэффициенты охлаждения P_1 и P_2 , омываемые водой и воздухом, которые входят в расчетные формулы, еще неизвестны и должны рассматриваться как функции элементов нефтеевоза.

Остановимся на этих зависимостях.

Естественно предполагать, что суммарная поверхность охлаждения пропорциональна полуокружности $(B + H)$ и длине грузовых танков, в соответствии с чем она может быть выражена зависимостью

$$F = kL(B + H),$$

где k — коэффициент утилизации длины судна, фигурирующий в уравнении зависимости нефтеевоза, приведенном в главе шестой.

Численное значение коэффициента k весьма стабильно и может быть принято равным $k = 2,2$ для нефтеевоза с наливным отделением, расположенным между грузовыми танками. Если наливное отделение смещается к корме от грузовых танков, значение коэффициента k уменьшается в соответствии с уменьшением числа поперечных переборок, через которые происходит теплообмен нефти с наружным воздухом.

Ниже приведены значения коэффициентов k и k по нескольким наливным судам.

P	700	2000	3000	1500
k	0,429	0,510	0,517	0,530
k	1,96-2,18	2,20	2,18	2,20

На нефтеевозах грузоподъемностью 2000-7500 т наливное отделение расположено между грузовыми цистернами. Для нефтеевоза грузоподъемностью 700 т с наливным отделением, расположенным в корме, наряду с фактическим значением коэффициента приведено его условное значение, полученное в предположении, что наливное отделение расположено между грузовыми танками.

Можно исключить из расчетных формул коэффициент λ , оперируя зависимостью

$$F = k_2 P^{\frac{2}{3}},$$

где P — вес перевозимого груза.

Для геометрически подобных судов коэффициент k_2 является постоянной величиной. В общем случае он менее стабилен, чем коэффициент k_1 . Приведем практические значения коэффициента k_2 по нескольким нефтевозам:

P	700	2000	3000	7500
F	633	1840	2150	3040
k_2	8,1—9,1	9,5	10,3	10,2

Как и в предыдущем случае, для нефтевозов грузоподъемностью 700 т значение коэффициента k_2 дано в двух расчетных предположениях. В предварительных расчетах можно принимать

$$k_2 \approx 10.$$

Ниже приведены данные, которые могут быть использованы для приближенного определения поверхностей F_1 и F_2 .

P	700	2000	3000	7500
$\frac{F_1}{F}$	0,55—0,59	0,50	0,48	0,54
$\frac{F_2}{F}$	0,45—0,51	0,50	0,52	0,45

В среднем $F_1 = F_2 = 0,5F$.

При выборе продолжительности подогрева нефтепродуктов следует иметь в виду, что в общем расходе тепла на подогрев нефтепродуктов доминирующее значение имеют потери, связанные с переходом тепла в воду и воздух. В соответствии с этим можно считать, что расход тепла на подогрев нефти приблизительно пропорционален продолжительности подогрева.

Для экономии топлива выгодно сокращать продолжительность подогрева нефтепродуктов, однако это связано с увеличением продолжительности котла и поверхности нагрева эжектора. Таким образом, вопрос о выборе продолжительности подогрева нефти должен решаться в каждом частном случае исходя из эксплуатационных и технических условий и учета экономической целесообразности того или другого решения.

При такой постановке задачи продолжительность подогрева в значительной мере определяется конечной температурой нефтепродуктов. В зависимости от их вязкости она выбирается в пределах от 40—45 до 60°С. Продолжительность подогрева нефти в часах, принятая в проектных расчетах запаса топлива по некоторым

отечественным нефтевозам, может быть выражена статистической зависимостью

$$T = k_3 P^{\frac{1}{4}},$$

где k_3 — численный коэффициент, равный в среднем 1,1—1,3. Цифры по отечественным нефтевозам приведены ниже.

P	700	2000	3000	7500	10 000	15 000
T	35	48	72	84	72	130
$\frac{T}{P^{\frac{1}{4}}}$	1,36	1,07	1,31	1,03	1,39	1,07

Продолжительность подогрева определяют также в зависимости от продолжительности перевозки груза t по формуле

$$T = 0,1t + 24,$$

но не более 120 часов.

Расход топлива на подогрев и выкучку нефти можно парировать в широких пределах в зависимости от отмеченных выше обстоятельств. В первоначальных ориентировочных расчетах можно считать, что на подогрев и выкучку каждой тысячи тонн нефти расходуется 5—8 м топлива.

Перейдем теперь к вопросу определения запаса питательной воды на судах, не имеющих испарителей. Он рассчитывается исходя из ожидаемой утечки пара e . Коэффициент e учитывает, помимо утечки пара через неплотности трубопроводов, также потери, связанные с продувкой котлов и кингстонов, трением пара и пр. Запас, рассчитанный на сумму воды в котлах, учитывается отдельно. Поскольку расход топлива пропорционален расходу пара, оказывается возможным выразить необходимый запас питательной воды непосредственно через запас топлива. Для этого воспользуемся формулой (37), приняв, кроме того, что в соответствии с ожидаемой утечкой пара e

$$P'_r = \tau e,$$

и переищем ее следующим образом:

$$P'_r = \frac{P'_r}{e} \frac{t_1 - t_2}{Q_1},$$

откуда

$$P'_r = \frac{e Q_1}{t_1 - t_2}.$$

Если автономность плавления по топливу и воде не одинакова, это должно быть учтено введением в последнюю формулу поправочного множителя.

Обычно для судов рассматриваемого типа, учитывая практические соотношения, можно принимать

$$\frac{\gamma}{\rho_0} \approx \frac{1}{800},$$

и, следовательно,

$$P_{\gamma} \approx \frac{P_{\gamma} Q}{800}.$$

Утечка пара зависит от длины трубопроводов и от тщательности, с которой они собраны. Обычно

$\epsilon = 0,04$ — на судах с паровыми машинами;

$\epsilon = 0,02-0,03$ — на турбинных судах;

$\epsilon = 0,06$ — для вспомогательной установки дизельных судов.

Приведенные формулы дают $P_{\gamma} = (0,30-0,35) P_{\gamma}'$ при установках с паровыми поршневыми машинами ($Q=6000-7000$ ккал/кг) и $P_{\gamma} = (0,25-0,37) P_{\gamma}'$ — для паротурбинных судов. Обычно с учетом запаса, необходимого на случай смены воды в котлах, принимают несколько большие коэффициенты, укладываемые в соотношение

$$P_{\gamma} = (0,4-0,5) P_{\gamma}'.$$

Расход питательной воды может поглотиться испарителями. При решении вопроса о целесообразности сберечь заборную воду следует учесть, что для получения 1 кг пресной воды приходится затрачивать около 0,1 кг нефти. Кроме того, установка испарителей удорожает стоимость машинной установки и может привести к увеличению длины машинного отделения.

Безусловно необходимо устанавливать испарители на судах с современными паротурбинными установками, при которых в качестве питательной воды применяется исключительно дистиллят. Это позволяет сократить запасы питательной воды до минимума, достаточного для смены воды в котлах и для действия котлов и тепловых насосов в течение периода времени [22].

На паротурбинных транспортных судах можно принимать в первом приближении запас питательной воды равным

$$P_{\gamma} = 0,05 P_{\gamma}'.$$

В § 13 приведены некоторые указания о применении испарителей для пополнения запасов питьевой и мыльной воды.

Переходя к рассмотрению третьей составляющей веса P_{γ} , отметим, что масло, используемое для смазки главных и вспомогательных двигателей, компрессоров, насосов, подшипников валопровода и т. п., частично сгорает (в цилиндрах двигателей) или уносится с паром и воздухом (в паровых поршневых машинах и компрессорах соответственно). Часть масла вытекает через неплотности

или соединений. Все это образует безвозвратные потери. Расход масла, затрачиваемого на компенсацию этих потерь, приблизительно пропорционален мощности соответствующих механизмов и продолжительности их работы. Поэтому можно считать, что в целом он пропорционален расходу топлива на действие машинной установки.

Запас масла, необходимый для смены его в системе циркуляции, зависит от типа и мощности двигателя.

Из изложенного следует, что составляющая P_{γ}' может рассматриваться как функция от P_{γ}' и N , однако в первом приближении можно принять

$$P_{\gamma} = \rho_{\gamma} P_{\gamma}',$$

где $\rho_{\gamma} = 0,04-0,06$ — для теплоходов;

$\rho_{\gamma} = 0,008-0,010$ — для турбинных судов.

Запас масла на судах с поршневыми паровыми машинами (при фатальной смазке), вследствие его малости, может практически не учитываться при определении элементов проектируемого судна.

Из сопоставления приведенных выше данных, относящихся к весу запасов топлива, воды и масла, можно видеть, что суммарный вес по рассматриваемому разделу нагрузки приводится к зависимости следующего вида:

$$P_{\gamma} = f(N);$$

$$P_{\gamma} = f(N) + q,$$

где q — постоянная величина.

§ 13. ИЗМЕРИТЕЛЬ ВЕСА СНАБЖЕНИЯ, КОМАНДЫ И ПРОФИЗИИ

В общем балансе нагрузки веса, объединяемые в разделе «Снабжение, команда и провизия», имеют относительно небольшое значение. На военных кораблях, судя по данным, которые приводятся в справочниках, они выражаются в процентах от нормального водоизмещения следующими цифрами:

Линейные корабли	1—2
Крейсера	2—4
Эскадренные миноносцы	3—5
Торговые, сторожевые корабли	4—8

От $\frac{1}{2}$ до $\frac{3}{4}$ рассматриваемых весов падает на команду, провизию, питьевую и береговую воду. Уже в первоначальных расчетах эти веса могут быть выделены из общего раздела нагрузки и легко подсчитаны в соответствии с требованиями заданий, что позволяет

ивести их в исходные функциональные зависимости в виде постоянного слагаемого. При проектировании пассажирских и грузо-пассажирских судов должен быть предварительно установлен также вес пассажиров с багажом.

Каких-либо единых обязательных нормативов, учитывающих веса команд и пассажиров с багажом, практика эксплуатации судов до настоящего времени не выработала. Обычно применяемые в расчетах цифры, характеризующие вес одного человека с багажом, лежат в следующих пределах (в кг):

Команда	100—120
Старшеком	120—150
Командный состав	150—180
Пассажиры	120—200
курортных линий, туристы	100—120

Вес человека без багажа принимается в расчетах равным 75 кг, с дефицитом тяжести на расстоянии 1,1 м от палубы.

Согласно советским санитарным правилам водопроводы питьевой и мыльной воды должны быть изолированы друг от друга, причем питьевая вода должна храниться во владных цистернах.¹ Полный запас пресной воды на одного человека (из состава экипажа и пассажиров) в сутки должен быть не менее 50 кг. При этом для судов, эксплуатируемых в заграничном плавании и большом количестве, а также плавающих в Охотском, Беринговом морях и Ледовитом океане, запас питьевой воды должен исчисляться из расчета 30 кг на одного человека в сутки. Для остальных судов эта цифра может быть снижена на одну треть.

Деятельная потребность в воде для питья значительно ниже, однако согласно правилам питьевая вода должна подниматься во все умывальники команды и пассажиров. Таким образом, под питьевой водой следует понимать всю воду, которая хранится во владных цистернах.

Приведенные цифры представляют собой минимальную норму. Фактически на пассажирских судах расход пресной воды составляет в среднем 50—100 кг на одного человека в сутки. Для лиц же, занимающих каюты с отдельными ваннами, расход воды достигает 300 кг на человека в сутки. В настоящее время ставится вопрос об увеличении нормы удельного расхода воды также и для команды (до 100 кг из них 40 кг во владных цистернах).

Потребность в пресной воде для бытовых нужд (если она не учитывается в норме) может быть определена расчетом с учетом количества ванн и душевых индивидуального пользования и пропускной способности ванн и душевых общего пользования. При этом

можно исходить из следующих цифр (в кг), характеризующих расход воды на различные нужды:

На ванну	200
• душ	40
• одно умывание	5
• умывание в сутки	10—15
Для питья, приготовления пищи и мытья посуды	10

Для пополнения запасов пресной воды передок пользуются опреснителями. При наличии опреснителей целесообразно вводить в нагрузку не менее пятисуточного запаса пресной воды. Иногда опреснители устанавливаются в виде резервного средства пополнения запасов воды.

В последнее время делались попытки использовать электрические способы обессоливания воды.

В курсе [34] приведены следующие цифры, выражающие запас пресной воды (в килограммах на одного человека в сутки), которые дают представление о практике США:

Пассажиры 1 класса	40—125
• 12	40—50
• 111	14—70
Команда	20—45

Верхний предел относится к крупным пассажирским лайнерам. Запас пресной воды для экипажа можно рассчитывать исходя из 2,5—3 кг на человека в сутки вместе с тарой, не считая непосредственного запаса, если он принимается на судно. На пассажирских судах необходимо считаться не только со среднесуточным расходом продовольствия, но также с необходимостью иметь разнообразный запас на складе. В соответствии с этим при подсчете продовольствия для пассажиров следует исходить из более высокой цифры, применяя в случае отсутствия специальных указаний суточный запас пресной на одного человека равным 4—6 кг. Из изложенного следует, что вес команды и пассажиров (с багажом), пресной воды и продовольствия выражается зависимостью

$$P'_c = \text{const.}$$

Составляющая P'_c , характеризующая вес снабжения в узком значении этого слова, может быть разбита в свою очередь на две составляющие, которые для грузовых судов выражаются в процентах следующих цифрами:

Изысканное снабжение к инструменту	65—75
Расходные материалы	25—35

Различают также снабжение шкиперское, снабжение по медицинской и электротехнической части, рестораторское снабжение, снабжение по отдельным видам вооружения. Каждая такая составляющая может быть пересчитана в отдельности по протопану. Практи-

¹ На некоторых судах предусмотрен единый система питьевой и мыльной воды, что приводит к усложнению требований, предъявляемых к водопроводу.

тически, однако, при определении элементов проектируемого судна можно принять суммарно

$$P_c^* = \rho_c^* D^{\frac{2}{3}}$$

где в среднем для грузовых судов $\rho_c^* = 0,03-0,06$. Для малых грузовых судов $\rho_c^* = 0,03-0,06$.

Поскольку вес P_c^* не имеет существенного значения в общем балансе нагрузки и поскольку порядок величин водоизмещения проектируемого судна заранее известен, можно также принимать $P_c^* = \text{const}$ и считать в соответствии с этим, что

$$P_c = P_c^* + P_c^* = \text{const}.$$

Так же следует поступить при переносе нагрузки применительно к ряду вариантов судна с закономерно изменяющимися элементами.

В технической литературе можно встретить предложения, рекомендуемые пересчитывать вес судна пропорционально водоизмещению судна, что представляется иррациональным.

§ 14. ЗАПАС ВОДОИЗМЕЩЕНИЯ

Как в эскизном, так и в техническом проекте в нагрузку вводится запас водоизмещения на неучтенные веса, просчеты и отступления фактических весов конструкций от теоретических весов, подсчитанных по чертежам и по данным контрагентов. В исполнительный нагрузку запас водоизмещения корректируется исходя из гарантированного водоизмещения и результатов расчета весов по рабочим чертежам. Из отчетной нагрузки запас водоизмещения исключается.

Невозможно назвать какие-либо цифры, устанавливающие минимальную и и то же время достаточную величину запаса водоизмещения, поскольку достоверность расчетов нагрузки зависит в значительной мере от искусства и опыта лиц, выполняющих эти расчеты. Можно рекомендовать вводить непосредственно в соответствующие статьи нагрузки запасы, гарантирующие от заводских перегрузок. В отношении неуката стали это проще всего сделать, принимая условно вес стали (для листов) равным 8 т/м^2 , что приводит к запасу в 1,6%. При этом, однако, нужно учесть, что увеличение расчетного удельного веса листовой стали может привести к погрешности в положении центра тяжести судна в сторону его занижения.

Обычно в техническом проекте, при пыльных расчетах нагрузки, базировались на достаточно подробно проработанных чертежах и хорошо подобранных и систематизированных практических данных, запас в 3-4% от водоизмещения порожнем оказывается достаточным. Представляется возможным ограничиться за-

пасом водоизмещения в 5% в эскизном проекте, если оговорена неопределенность некоторого изменения полученных размеров судна в техническом проекте.

В этой связи можно отметить, что по мере накопления опыта определения весов запас, который вводится в расчеты, должен постепенно уменьшаться.

Наряду с запасом в водоизмещении необходимо вводить запас в минимую гарантируемую метацентрическую высоту. Для этой цели, учитывая, что практически суда перегружаются в высококорпусных частях, целесообразно считать, что центр тяжести запаса водоизмещения лежит выше теоретического центра тяжести. Можно рекомендовать выбрать ординату центра тяжести запаса водоизмещения таким образом, чтобы гарантированное положение центра тяжести судна порожнем превосходило расчетную цифру приблизительно на 10-15 см. Если на судах с чрезмерной остойчивостью гарантируется нижний предел метацентрической высоты, то можно считать, что центр тяжести запаса водоизмещения расположен в центре тяжести судна или несколько ниже его.

Иногда возможные отступления от теоретически найденных значений начальной метацентрической высоты оговариваются в спецификации без учета их в нагрузку. В подобных случаях необходимо вводить гарантийный запас в соответствующие расчеты, например в расчеты аварийной остойчивости и остойчивости при больших углах крена. В противном случае расхождения между отчетными и проектными расчетами могут привести к тремстам с органами наблюдения даже в тех случаях, когда полученные значения метацентрической высоты окажутся не ниже гарантийных.

В функциональных зависимостях, используемых при определении элементов судна, запас водоизмещения может быть введен не только в виде надбавки к водоизмещению, но и в виде постоянного слагаемого, поскольку порядок величин водоизмещения порожнем заранее известен. Кроме того, можно вводить запас водоизмещения в виде надбавки к весам корпус, механизмов и броневооружения. Если запас водоизмещения выражен в долях водоизмещения не порожнем, а нормального или полного, следует уменьшить соответствующим образом долю запаса его в общем водоизмещении.

В соответствии с изложенным запас водоизмещения может быть выражен следующими зависимостями:

$$P_c = \text{const};$$

$$P_c = \rho_c D;$$

$$P_c = \rho_c (P_c + P_c + P_c).$$

Правильнее всего представляется рассматривать запас водоизмещения как независимый вес, поскольку он претерпевает в процессе разработки проекта многократные изменения. За счет запаса

аэродинамические погрешности, являющиеся следствием приближенного характера предварительных проектных расчетов и разбросов, вызванных изменениями принятых ранее решений.

6.15. ДАННЫЕ ПО НАГРУЗКЕ ТРАНСПОРТНЫХ СУДОВ

В качестве примера в табл. 11 и 12 приведены данные по нагрузке некоторых транспортных судов. Распределение весов по отдельным составляющим нагрузки соответствует указанию, приведенное в § 3. Наряду с абсолютными весами приведены численные значения коэффициентов

$$g_s = \frac{p_s}{|p|}; \quad g_m = \frac{p_m}{|p|};$$

$$\bar{g}_{\text{eff}} = \frac{p_{\text{eff}}}{(\bar{L}, \bar{M})^{\frac{2}{3}}}; \quad \bar{g}_{\text{eff}} = \frac{p_{\text{eff}}}{\bar{r}^{\frac{2}{3}}}; \quad p_{\text{eff}} = \frac{p_{\text{eff}}}{N}.$$

Табл. 12 составлена по данным, приведенным в книге [2], в которой можно найти более полные сведения по нагрузке на обшивку расположенную рассматриваемых судов. Обширный материал по нагрузке американских плавучих судов приведен в работе [64].

Telephone 11

Данные по маркету транзакционных услуг

Параметры	1	2	3	4	5	6
Назначение судна	Груз.	Груз.	Груз.	Рефр.	Нф	Нф
Длина	20,0	118,0	108,0	118,0	136,0	108,0
Ширина	11,7	18,5	22,5	16,8	19,2	25,8
Площадь Борта	2,8	22,0	24,0	19,5	26,4	27,7
Площадь	3,0	7,0	8,7	8,4	8,30	10,30
Коэффициент общей тоннажности	0,070	0,060	0,060	0,064	0,058	0,070
Тонн. вытеснения	Датчик	118,0	108,0	Датчик	Датчик	Штатный
Плотность вытесняемого	1,000	1,010	1,000	1,010	1,000	1,010
Сред. в течение периода	500	510	500	500	500	510
Сред. в течение периода	400	500	400	400	400	500
Площадь по корпусу	800	2000	2010	2010	6000	7000
Площадь	100	400	300	400	400	1000
Датчик	30	30	30	30	30	30
Сред. в течение периода	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Сред. в течение периода	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Температура, высота, место	100	500	2000	400	100	2000
Температура, высота, место	100	500	2000	400	100	2000
Датчик	110	400	300	400	400	1000
Плотность вытесняемого	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Коэффициент упругости тонн	0,513	0,500	0,513	0,488	0,500	0,513
$E_{\text{тонн}} = P_{\text{тонн}} / (A \cdot H)$	0,398	0,198	0,398	0,118	0,118	0,494
$E_{\text{тонн}} = P_{\text{тонн}} / (A \cdot H)$	0,513	0,198	0,118	0,398	0,494	0,118
$E_{\text{тонн}} = P_{\text{тонн}} / (A \cdot H)$	1,31	1,07	1,28	1,08	1,08	1,07
$E_{\text{тонн}} = P_{\text{тонн}} / (A \cdot H)$	3,48	2,52	2,54	3,68	2,69	3,00
$E_{\text{тонн}} = P_{\text{тонн}} / (A \cdot H)$	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000

Сред. в течение периода — среднее значение; рефр. — рефрактивный; нф — нефть.

Ānāpānāsati bhāṣā = ānāpānāsati bhāṣā; ānāpānāsati bhāṣā = ānāpānāsati bhāṣā; ānāpānāsati bhāṣā = ānāpānāsati bhāṣā

Performance is

Downloaded from <http://ajphaphysocpharm.com/> on November 10, 2015

[illegible]

ПОЛОЖЕНИЕ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ СУДА. ПЕРВОНАЧАЛЬНАЯ УДИФФЕРЕНТОВКА И БАЛЛАСТИРОВКА СУДА В ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ

§ 1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ СХЕМА ОБЩЕГО РАСПОЛОЖЕНИЯ И ЭПОРА ЕМКОСТИ

Уже в начальных стадиях разработки проекта для того, чтобы иметь возможность достаточно точно определить положение центра тяжести судна, необходимо вычертить схему общего расположения в виде продольного разреза. Целесообразно одновременно построить и предварительную эпюру емкости.

Масштаб схемы общего расположения судна удобно принимать таким, чтобы она могла быть вычерчена на одинарном или развернутом листе писчей бумаги. На схеме показывают палубы, главные переборки, двойное дно, габариты надстроек, штееры для топлива, пресной воды и балласта и те конструкции или устройства, расположение которых учитывается в первоначальных расчетах положения центра тяжести судна. Достаточно точно должны быть вычерчены кривые осадковости палуб. Если имеются бортовые штееры, полезно показать их на поперечном сечении судна.

В качестве примера на рис. 14 приведена схема общего расположения грузового судна.

Для построения эпюры емкости нужно подобрать подходящую по коэффициенту предельной полноты строую по шпангоутам и соответствующую ей грузовую интервалию. Это затрудню сделать, рассмотрев вспомогательные материалы, которыми пользуются при построении теоретического чертежа.

По основной (горизонтальной) линии эпюры емкости откладывают длину судна и длины отдельных отсеков. После этого в качестве вспомогательной линии вычерчивают строую по шпангоутам. От строовой вверх откладывают площади поперечных сечений судна, лежащие между грузовой интервалией и верхней палубой. Эти площади определяют как площади прямоугольников, основанием которых служат соответствующие ординаты грузовой интервалии. Высота прямоугольников определяется по схеме общего расположения как расстояние от грузовой интервалии до верхней палубы в соответствующей точке.

Кривая, соединяющая полученные точки, характеризует распределение по длине судна площадей, соответствующих полному внутреннему объему судна по верхней палубе. Аналогичным образом вычерчивают кривые площадей до нижележащих палуб и платформ.

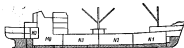


Рис. 14. Схема общего расположения.

№ 1—3 — номера трюмов.

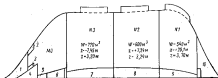


Рис. 15. Эпюра емкости грузового судна.

Отсек	Валы	W, м ²	z, м	z, м	Отсек	Валы	W, м ²	z, м	z, м
1	Топливо	40	-30,0	4,37	6	Топливо	30,0	-20,0	0,80
2	Топливо	20	-20,0	4,20	7	Балласт	20,0	-7,5	0,45
3	Масло	10	-10,0	4,00	8	Балласт	10,0	-7,5	0,45
4	Топливо	10	-10,0	2,15	9	Балласт	10,0	-10,0	0,45
5	Масло	5	-22,7	0,30	10	Балласт	10,0	-10,0	0,45

Площади двойного дна в районе модели определяют по предварительному обводу модель-шпангоута. Найденная площадь откладывается на эпюре емкости, а затем на глаз проводится вся кривая площадей двойного дна.

После нанесения водонепроницаемых переборок и водонепроницаемых флор, разделяющих двойное дно на отсеки, по эпюре емкости подсчитывают теоретические объемы и положение центра тяжести по длине грузовых трюмов (включая грузовые люки) и штееры для топлива, пресной воды и балласта. Положение центра тяжести этих отсеков по высоте определяется по схеме общего расположения.

Объемы отсеков и координаты их центра тяжести по высоте и длине целесообразно отмечать непосредственно на яноре емкости. При этом наряду с теоретическими нужно указать фактические объемы, полученные с учетом вычетов на набор и объем дала. Эти вычеты приведены в главе шестой.

После построения теоретического чертежа намечаются уточненная янора емкости.

В качестве примера на рис. 15 приведена янора емкости грузовой судна.

§ 2. ПОЛОЖЕНИЕ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ СУДА ПО ВЫСОТЕ

Для приближенной оценки положения центра тяжести судна по высоте можно воспользоваться соотношением

$$Z_g = \xi H;$$

$$Z_g = \xi_1 H_1,$$

где Z_g — ордината центра тяжести;
 ξ и ξ_1 — практические коэффициенты, численные значения которых устанавливаются по протолину;
 H_1 — приведенная высота борта, которая подсчитывается по уже рассмотренной ранее формуле

$$H_1 = H + h_{\text{с}} \frac{L_{\text{с}}}{L}.$$

Коэффициенты ξ и ξ_1 связаны соотношением

$$\frac{\xi}{\xi_1} = \frac{H_1}{H} = 1 + \frac{h_{\text{с}}}{H} \frac{L_{\text{с}}}{L}.$$

Таблица 13

Ориентировочные пределы значений коэффициента ξ

Типы судов	Порожнем	В грузу
Грузовые суда с минимальным надводным бортом	0,62—0,64	0,63—0,65
Грузовые и пассажирские суда	0,58—0,60	0,60—0,62
Пассажирские суда	0,55—0,58	—
Вулкеры	0,70—0,85	0,70—0,80
Транспорты	0,75—0,83	0,70—0,78
Тяжелые бронированные корабли	—	0,70—0,75
Легкие корабли	—	0,75—0,80

В табл. 13 указаны ориентировочные пределы значений коэффициента ξ применительно к судам различных типов, имеющие лишь наглядное значение. Для гражданских судов они относятся

к возмозможным порожнем и в полном грузу, а для военных кораблей — к нормальному возмозможению.

Уже в начальных стадиях проектирования положение центра тяжести запасов топлива и воды, а также коммерческого груза на гражданских судах и боезапаса на военных кораблях может быть установлено с достаточной точностью по схемам общего расположения судна. Поэтому целесообразно пересчитывать по протолину лишь положение центра тяжести судна порожнем и устанавливать положение центра тяжести судна в полном грузу и в других условиях нагрузки путем дополнительных более детальных расчетов по статическим чертежам. Пренебрежение этим правилом может привести к грубым просчетам.

В предварительных расчетах при определении центра тяжести коммерческого груза на грузовых судах можно исходить из следующих данных.

Центр тяжести грузовых трюмов расположен над настилом двойного дна приблизительно на высоте $0,53(H-h_{\text{с}}) + 0,25h_{\text{с}}$, где $h_{\text{с}}$ — высота двойного дна; $h_{\text{ср}}$ — средняя седловатость.

В соответствии с этим положение центра тяжести грузовых трюмов над основной линией может быть выражено формулой

$$z_{\text{г}} = \xi_{\text{г}} H = 0,53(H-h_{\text{с}}) + 0,25h_{\text{с}} + h_{\text{с}}. \quad (38)$$

Учитывая, что приблизительно $h_{\text{с}} = 0,155T$, можно переписать формулу (38) следующим образом:

$$\xi_{\text{г}} = 0,53 + 0,073 \frac{T}{H} + 0,25 \frac{h_{\text{с}}}{H}.$$

В среднем для сухогрузных судов $\xi_{\text{г}} = 0,62—0,63$, а для наливных судов с нормальной седловатостью $\xi_{\text{г}} \approx 0,53$.

После построения теоретического чертежа центры тяжести грузовых трюмов и цистерн определяются детальным расчетом по практическим сечениям так, как это указано в главе шестой.

При проектировании транспортных судов ордината центра тяжести стального корпуса с надстройками $z_{\text{к}}$ может быть определена по графикам, приведенным на рис. 16—20, заимствованным из работы Рабена [63]. Эти графики позволяют определить отношение $z_{\text{к}} : H$ в зависимости от длины судна и коэффициента общей волкости. Рис. 16—18 относятся к судам с минимальным, а рис. 19 и 20 — к судам с избыточным надводным бортом (по классификации 20-х годов — суда со «слоньей надстройкой»).

Каждый график содержит семейство кривых, соответствующих гладкоаллюбовому судну, судну с надстройками длиной, равной 20% от длины судна, и судну с надстройками, простирающимися на протяжении 40% от длины судна. Меньшая цифра дается для судна

1 Более точно можно определить высоту двойного дна с помощью данных, приведенных в § 3 главы шестой.

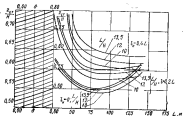


Рис. 16. Выявление центра тяжести стоек в составе маршур над основной плоскостью по Рабелу. Однозубые суда с минимальным разводом бортом.

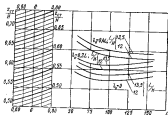


Рис. 17. Возвышение центра тяжести снаги в составе корабля над основной плоскостью ко Рабону. Двухпалубные суда с минимальным издрезанным бортом.

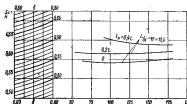


Рис. 18. Выходящее из центра тяжести судна в составе корабля над основной плоскостью по Рыбеву. Трёхзубые суда с минимальным количеством бортов.

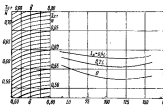


Рис. 19. Возмущенные центры тяжести стали в составе корпуса над основной плоскостью по Рабену. Двухпалубные суда со сплошной надстройкой.

с боксом длиной 7% и средней надстройкой длиной 13% от длины судна. Большая цифра относится к судну с боксом, средней надстройкой и ютом, равными соответственно 7; 25 и 8% от длины судна. Каждая кривая соответствует определенному отношению длины судна к высоте борта, которые отмечены на диаграмме. Масштабы, отложенные по оси ординат, соответствуют судам с различными коэффициентами общей полноты, изменяющимися в пределах $\delta = 0,60-0,80$.

При других длинах надстроек положение центра тяжести стального корпуса может быть определено путем пересчета. Для этого

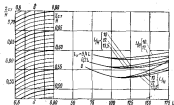


Рис. 28. Возвышение центра тяжести стали в корпусе судна над основной плоскостью по Рабену. Треугольные суда со средней надстройкой.

с помощью диаграммы на рис. 13 нужно учесть влияние положительного или отрицательного прераспределения веса надстроек.

Графики Рабена относятся к клепаным корпусам. При переходе к корпусам сварным конструкциям центр тяжести стали в составе корпуса поднимается, по Рабену. Для судов с минимальным надводным бортом на 0,5—1,0% при длине судна 90 м и на 2% — при длине судна 150 м. Для шельтеретных судов при переходе к сварным конструкциям центр тяжести стального корпуса с надстройками поднимается примерно на 1%. Есть основания считать, что эти цифры переоценивают влияние сварки на положение центра тяжести судна.

Если нагрузка судна определяется путем постоянного пересчета весов по прототипу, рационально использовать этот прием и для пересчета центра тяжести судна по высоте. Последним судностроителем на нескольких примерах с тем, чтобы дать представление о наиболее типичных формулах, которые могут быть использованы для этой цели.

Возвышение центра тяжести наружной обшивки над основной линией обычно пересчитывают по формуле $z_1 = \frac{1}{2} H_1$, где H_1 — приведенная высота борта.

Более точные результаты могут быть получены в предположении, что изменение высоты борта и ширины судна-прототипа соответственно на ΔH_0 и ΔB_0 вызывает увеличение веса наружной обшивки на

$$\Delta P_0 = \frac{1}{2} P_0 \frac{\Delta H_0}{H_0} + \frac{1}{2} P_0 \frac{\Delta B_0}{B_0}.$$

Будем считать, что центр тяжести первой составляющей веса ΔP_0 расположен на высоте $H_0 + \frac{1}{2} \Delta H_0$, а момент второй составляющей равен нулю. Тогда можно составить уравнение моментов

$$\left(P_0 + \frac{1}{2} P_0 \frac{\Delta H_0}{H_0} + \frac{1}{2} P_0 \frac{\Delta B_0}{B_0} \right) Z_1 = P_0 z_0 + \frac{1}{2} \Delta P_0 \frac{\Delta H_0}{H_0} \left(H_0 + \frac{1}{2} \Delta H_0 \right),$$

позволяющее определить

$$Z_1 = \frac{z_0 + \frac{1}{2} \frac{\Delta H_0}{H_0} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta H_0}{H_0} \right)}{1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta H_0}{H_0} + \frac{1}{2} \frac{\Delta B_0}{B_0}}.$$

Аналогично можно учесть влияние изменения длины судна. Центр тяжести палуб может быть пересчитан по формуле

$$z_2 = H + h_2 + 0,5f + h_3,$$

где h_2 — расстояние рассматриваемой палубы от верхней палубы считая по шпандель-изогнуту;

f — выгиб бимсов;

δ_2 — практический коэффициент, который определяется по прототипу;

h_3 — средняя седловатость.

Приведенная формула может применяться для палуб, расположенных ниже и выше верхней палубы.

Допустим, что центр тяжести мачты судна-прототипа расположен над основной линией на расстоянии

$$(z_3)_0 = H_0 + h_3 + h'_3,$$

где h_3 — седловатость верхней палубы в диаметральной плоскости в месте расположения мачты;

h'_3 — высота мачты;

h''_3 — возвышение центра тяжести мачты над верхней палубой в месте расположения мачты.

Переданием на чертеже судна-прототипа мачту таким образом, чтобы относительные расстояния x_0/L_0 и x/L от оснований мачт сопоставляемых судов до модели оказались бы одинаковыми. Вследствие перемещения мачты сдвигается A_0 изменится на величину ΔA_0 , которая может быть снята с чертежа судна-прототипа. После этого можно будет определить ординату центра тяжести мачты проектируемого судна по формуле

$$z_0 = H + (A_0 + \Delta A_0) \frac{A_0}{A_0 + A_0} + z_0 f.$$

Так же пересчитываются ординаты центров тяжести весов различного рода устройств и оборудования, расположенных на палубах, платформах и настила двойного дна, причем для стандартного оборудования

$$W = 1 \text{ дем}$$

при одинаковой высоте фундаментов и стеллажей.

Для продолжных и поперечных переборок можно написать

$$z_0 = z_0 H.$$

Ордината центра тяжести настила внутреннего дна выразится формулой

$$z_0 = z_0 h_0.$$

В этой формуле высота двойного дна может рассматриваться либо как величина, пропорциональная осадке (для гражданских судов), в соответствии с чем

$$z_0 = z_0 T,$$

либо как величина, не зависящая от элементов судна. В этом случае

$$z_0 = \text{const.}$$

Иногда высота двойного дна задается в долях высоты борта и, следовательно,

$$z_0 = z_0 H.$$

При комплексном пересчете весов систем, электрооборудования, оборудования помещений и т. п. обычно считают, что ординаты центров тяжести этих весов изменяются пропорционально высоте борта или приведенной высоте борта.

Таким образом, мы приходим к следующей системе формул для пересчета ординат центров тяжести отдельных весов:

$$z_0 = z_0 H; \quad z_0 = z_0 \frac{T}{H};$$

$$z_0 = z_0 H + z_0; \quad z_0 = z_0 \frac{T}{H} + z_0;$$

$$z_0 = z_0 H; \quad z_0 = \text{const.}$$

не считая более сложной формулы для пересчета центра тяжести наружной обшивки. В этих формулах буквой f обозначается отрезок длины.

В каждом частном случае, сопоставляя предварительные эскизы общего расположения проектируемого судна с чертежами судна-прототипа, конструктор составляет таблицу переходных формул для пересчета ординат центров тяжести отдельных весов, аналогичную табл. 10.

Ордината центра тяжести оборудованного корпуса ряда отечественных сварных сухогрузных судов в среднем не выходит из пределов

$$z_0 = (0,77 - 0,85) H = (0,70 - 0,75) H.$$

Эти цифры относятся к судам с длиной от 6000—13000 м. При меньшем деците ордината z_0 быстро возрастает с уменьшением размеров судна.

Ордината центра тяжести корпуса некоторых иностранных клепаемых сухогрузных судов, отмеченных в курсах [1] и [2], изменяется в пределах

$$z_0 = (0,63 - 0,77) H.$$

Меньшая цифра относится к шельфедным судам.

При сварных конструкциях центр тяжести корпуса перемещается несколько вверх. Этим отчасти объясняется более высокое положение центра тяжести советских судов. Кроме того, нужно учесть, что численность команды на судах отечественной постройки больше, чем на иностранных судах. Вследствие этого возрастает вес оборудования, центр тяжести которого лежит выше центра тяжести корпуса. В некоторых случаях сказывается и сравнительно большой вес изоляции жилых помещений на советских судах, которые проектируются с учетом возможности их эксплуатации при низкой температуре наружного воздуха.

Для ряда иностранных пассажирских судов, отмеченных в упомянутом выше курсе [1],

$$z_0 = (0,76 - 0,84) H.$$

Применяя это соотношение к судам с удлиненным баком, перекидывающим большую часть верхней палубы, следует исходить из высоты борта, измеренной до палубы бака. При постройках других типов высота борта измеряется до верхней палубы. Как и в предыдущем случае, формула относится к судам с клепаемым корпусом.

Возрастание центра тяжести силовых установок z_0 над основной линией изменяется в широких пределах в зависимости от типа установки, ее расположения и высоты борта судна. В среднем для сухогрузных судов

$$\frac{z_0}{H} = 0,45 - 0,55$$

с относительно большими отклонениями в обе стороны.

Ордината центра тяжести рассмотренных автором силовых установок наливных судов лежит в пределах

$$\frac{z_0}{H} = 0,55 - 0,65.$$

§ 1. ПОЛОЖЕНИЕ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ СУДНА ПО ДЛИНЕ

В начальных стадиях разработки проекта целесообразно определять абсциссы центра тяжести корпуса и механизмов путем пересчета по прототипу. Положение же центра тяжести отдельных трюмов и цистерн может быть определено по схеме общего расположения и шкере емкости.

В пересчетах по прототипу естественно исходить из предположения, что абсциссы центра тяжести стали в составе корпуса и, равным образом, корпуса в сборе изменяются пропорционально длине судна. В некоторых случаях при этом необходимо учесть влияние протяженности отдельных надстроек судна-прототипа и проектируемого судна. Положение центра тяжести веса машинных установок определяют по прототипу относительно одной из переборок машинно-котельных отделений. После этого отсчитывается абсцисса этого веса, измеренная от миделя.

Для первой ориентировки в вопросе можно использоваться приведенные ниже цифры, характеризующие положение центра тяжести по длине трех укрупненных составляющих нагрузки некоторых типов грузовых судов. Эти цифры выводят абсциссу центра тяжести, измеренную в процентах от длины судна по миделю, вертикализируем. Они были получены путем обработки данных, заимствованных из литературных источников и процентных материалов. В дальнейшем изложении индекс k , m , p отнесены соответственно к весам корпуса, механизмов и судна порожнем. Абсцисса x отсчитывается от миделя и во всех рассмотренных случаях располагается в корму от него.

Для сухогрузных судов с центральным расположением машинного отделения

$$x_k = 0,2 - 1,5;$$

$$x_m = 9,0 - 16,0;$$

$$x_{sp} = 1,5 - 2,5.$$

Для сухогрузных судов с кормовым расположением машинного отделения

$$x_k = 2,0 - 3,0 - \text{на судах со средней надстройкой};$$

$$x_k = 4,5 - 5,5 - \text{на судах без средней надстройки};$$

$$x_m = 30,0 - 36,0;$$

$$x_{sp} = 7,0 - 9,0.$$

Для нефтеналивных судов со средней надстройкой

$$x_k = 1,5 - 2,0;$$

$$x_m = 35,0 - 37,0;$$

$$x_{sp} = 5,0 - 7,0.$$

Для последних судов можно в первом приближении считать, что центр тяжести машинной установки расположен на расстоянии

$$x'_m = 0,6 l_m$$

в нос от переборки котерника. В последней формуле под l_m понимается длина машинного отделения.

В работе [2] для ряда судов, построенных в США, можно найти более детализированные данные о центре тяжести весов.

§ 4. ПЕРВОНАЧАЛЬНАЯ УДИФФЕРЕНТОВКА СУДНА

Удифферентовать судно — значит так распределить грузы по его длине, чтобы центр тяжести судна совпал с принятым положением центра величины. Приступая к удифферентовке, выбирают положение центра величины с таким расчетом, чтобы сопряженным судам с принятым главным размерением и принятым коэффициентом общей полноты приближалось к минимальному. Таким образом, задача удифферентовки судна сводится к такому распределению грузов, входящих в нагрузку, при котором положение его центра тяжести совпадает с выбранным и соответствием с требованиями гидромеханики положением центра величины. При этом проектировщик сохраняет все же некоторую свободу действий, поскольку можно перемещать в некоторых пределах центр величины без риска существенно ухудшить гидроталассие веса движению судна.

Для удифферентовки судна целесообразно предварительно определить проверочным расчетом положение его центра тяжести, соответствующее назначенной в первом приближении схеме общего расположения. После этого выявляются изменения, которые необходимо внести в первоначальные предположения для надлежащего смещения центра тяжести судна по длине.

Имеется два основных способа удифферентовки: путем перемещения грузов и изменения назначенной ранее длины судна. В качестве модификации первого способа можно отметить удифферентовку путем изменения архитектурного типа судна.

Остановимся сначала на удифферентовке, связанной с перемещением грузов.

Пусть уравнение моментов, соответствующее проверочному расчету удифферентовки, который производится в табличной форме, будет

$$Dx_0 = P_1 x_1 + P_2 x_2 + \dots + P_{n-1} x_{n-1} + P_n x_n. \quad (39)$$

причем в общем случае x_c не равно абсциссе центра величины x_v . В соответствии с этим требуется переместить некоторые грузы, например грузы P_1 и P_2 , таким образом, чтобы абсцисса x_c оказалась равной x_v . Для этого необходимо удовлетворять уравнению моментов

$$Dx_c = P_1(x_1 + \Delta x_1) + P_2(x_2 + \Delta x_2) + \dots + P_{n-1}x_{n-1} + P_n x_n.$$

Иначе говоря, необходимо выбрать Δx_1 и Δx_2 таким образом, чтобы было обеспечено равенство

$$\Delta x = x_c - x_v = \frac{P_1 \Delta x_1 + P_2 \Delta x_2}{D}$$

или в общем виде

$$\Delta x = \frac{\sum P_i \Delta x_i}{D} \quad (40)$$

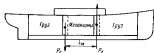


Рис. 21. Удифферентовка судна перемещением грузов.

Поясним сущность этой задачи на примере удифферентовки грузового судна (рис. 21) в предположении, что она осуществляется путем перемещения в нос машинного отделения, связанной с ним надстройки и топливного бункера, расположенного в машинном отделении. Перемещение машинного отделения вызовет, кроме того, уменьшение длины носовых грузовых трюмов при таком же удлинении кормовых трюмов. В соответствии с этим часть коммерческого груза переместится из носовых трюмов в кормовые на расстояние l_m , равное длине машинного отделения.

Проведем расчет, предполагая вначале, что машинное отделение передвинуто на l_m . В этом случае вес перемещаемого коммерческого груза найдется по формуле

$$P_c = \frac{k}{p} B(H - h_d),$$

где k — отношение площади поперечного сечения трюма, которая фактически может быть использована для перевозки груза, к произведению $B(H - h_d)$ (см. шестую главу);
 p — удельная погрузочная кубатура (см. шестую главу).

Обозначим, кроме того, через P_m , P_n и P_t вес перемещаемого оборудования машинного отделения, надстройки и топлива в пределах машинного отделения.

Из формулы (40) следует, что каждое в отдельности перемещение этих грузов на l_m изменит абсциссу центра тяжести судна на величину

$$\Delta x_m = \frac{P_m}{D}; \quad \Delta x_n = \frac{P_n}{D}; \quad \Delta x_t = \frac{P_t}{D}.$$

Перемещение груза P_c на расстояние l_m изменит, кроме того, абсциссу центра тяжести судна на величину

$$\Delta x_c = -\frac{P_c l_m}{D}.$$

Таким образом, при перемещении машинного отделения в нос на l_m суммарное изменение абсциссы центра тяжести судна выражается формулой

$$(\Delta x)_{l_m} = \frac{P_m + P_n + P_t - P_c l_m}{D}.$$

Для того, чтобы абсцисса центра тяжести судна изменилась на заданную величину Δx , необходимо сместить переборки машинного отделения на величину

$$\Delta l = \frac{\Delta x}{(\Delta x)_{l_m}}.$$

Такой способ удифферентовки оказался бы неспригодным, если

$$(\Delta x)_{l_m} \approx 0,$$

т. е. если $P_c l_m$ мало отличается от суммы $(P_m + P_n + P_t)$. В подобных случаях может оказаться необходимым изменить длину судна, замеченную в первом приближении, с тем чтобы осуществить удифферентовку за счет изменения расположения переборок таранного отсека и актершка.

Допустим, например (рис. 22), что, изменив масштаб вдоль длины судна, мы увеличили длину носовой и кормовой половин корпуса на величину $1/2 \Delta L$. Так как это приращение длины мало по сравнению с длиной судна, можно в дальнейшем пренебречь влиянием изменения абсциссы центра величины и абсциссы центра тяжести корпуса.

Используем удлинение судна для того, чтобы сместить все переборки и надстройки, а с ними и все оборудование судна в нос или корму на расстояние $1/2 \Delta L$. Это создаст дифференцирующий момент

$$M = (D - P_m) \frac{\Delta L}{2}.$$

¹ Предполагается, что изменение пропорций и веса корпуса при удлинении судна компенсировано изменением других элементов.

который приведет к изменению абсциссы центра тяжести судна на величину

$$\Delta x = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{P_K}{D} \right) \Delta L.$$

Эта формула позволяет определить изменение длины судна, удовлетворяющее условиям дифферентки. После этого придется пересмотреть принятые ранее элементы судна.

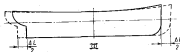


Рис. 22. Условия дифферентки при изменении длины судна.

Приведенный пример показывает, что длина судна оказывает существенное влияние на условия дифферентки. Во многих случаях, в частности при машинных отделениях, расположенных в кормовой части судна, условия дифферентки ограничивают практически нижний предел длины судна.



Рис. 23. Дифферентка путем изменения архитектурного типа судна.

Сущность дифферентки, связанной с изменением архитектурного типа судна, может быть пояснена рис. 23.

Допустим, что вначале предполагалось спроектировать суинотрекопного типа, как это показано на рисунке, а затем выявилась необходимость перенесения центра тяжести судна в корму. Это может быть сделано за счет архитектурных изменений, в частности путем перехода к типу судна с удлиненным ютом. В этом случае в кормовой части судна получается дополнительный тандем, выделенный штриховкой, который может быть использован для перевозки груза.

Тот же результат (с качественной точки зрения) можно получить путем перехода к квартердечному судну.

Рассмотренный способ весьма эффективен, однако он приводит к изменению первоначальных предположений о нагрузке, остойчивости, высоте надводного борта и удельной вместимости. Поэтому решение об изменении архитектурного типа судна приводит к необходимости пересмотреть принятые элементы судна.

§ 3. МИНИМАЛЬНАЯ ОСАДКА СУДНА НОСОМ И КОРМОЙ В БАЛЛАСТНОМ ПРОБЕГЕ

Емкость балластных цистерн должна быть достаточной для поддержания остойчивости судна в рейсе на надлежащем уровне и для регулирования осадки носом и кормой в рациональных пределах при различных условиях загрузки. Первое из этих требований имеет значение в основном для пассажирских, а второе — для грузовых судов. Лишь в редких случаях (если не считать перевозки на палубе тяжелых грузов) последние нуждаются в балластном прогоне для улучшения остойчивости (например лесовозов).

Ниже вопрос о необходимой емкости балластных цистерн излагается с точки зрения осадки грузовых судов в балластном прогоне.

При недостаточном погружении гребного вала в воду, а еще в большей мере — при частичном обнажении его лопастей эффективность вала снижается. Это выражается в снижении коэффициентов момента и упора, вследствие чего двигатель при спецификационном числе оборотов не может развить полную мощность. Засасывание воздуха также сказывается отрицательно на работе гребных винтов и способствует образованию кавитации. Резкие колебания упора и вращающего момента могут явиться причиной перебоев в работе главного двигателя и вызвать вибрацию валопровода и кормовой оконечности судна.

На существующих грузовых судах нижний предел относительного погружения гребного вала в балластном пробеге равен примерно 0,20—0,25. В редких случаях, притом большей частью на малых судах, он падает до 0,60. В качестве максимальных цифр можно назвать $d_{гр}/d = 0,85—0,90$, но иногда относительное погружение вала повышается и более высокими цифрами.

Г. Боклер в докладе [51] рекомендует обеспечивать в тяжелых условиях плавания возможность погружать винты на 80%. В прениях по этому докладу продолжались и другие цифры. В частности, Эйр высказался за погружение вала на 100%, имея, вероятно, в виду условия плавания в Северной Атлантике.

По-видимому, в качестве минимальной цифры для судов океанского плавания целесообразно принять $d_{гр}/d = 0,75$, однако более благоприятным соотношением представляется $d_{гр}/d = 0,8$.

Для предотвращения повреждения днища от гидродинамических ударов судно в балластном пробеге должно иметь также достаточную осадку носом. По Боклеру, она может выбираться в пре-

делах от 2,5 до 3,0% от длины судна. Кинг в принципе по докладу Боксера рекомендовал придерживаться большей из отмеченных цифр.

Не следует делать балластные цистермы излишне большими, так как это приводит к неоправданному снижению полезной кубатуры грузовых трюмов. Кроме того, в некоторых случаях, вследствие более неравномерного распределения нагрузки по длине судна, могут увеличиваться изгибающие моменты, особенно при неудачном расположении цистерн. Сказанное относится как к рейсам с полным коммерческим грузом, так и к переходам без груза, но с полным заполнением балластными цистермами.

При сравнительно благоприятных условиях плавания количество принимаемого балласта должно быть уменьшено. Чрезмерная балластировка приводит в этом случае к снижению скорости, вследствие увеличения подкашивания. Ответственность за правильное использование балластных цистерн лежит на капитане судна, который должен учитывать, наряду с нагрузкой судна, также состояние моря и погоды.

5.4. РАСПОЛОЖЕНИЕ И ЕМКОСТЬ БАЛЛАСТНЫХ ЦИСТЕРН

В качестве балластных цистерн используются форпик, актерник, отсеки двойного дна и так называемые динтаки (высокие цистерны). Последние либо делятся по палубы (обычно наиболее низко расположенной), либо ограничиваются местной платформой, либо, наконец, образуются путем местного увеличения высоты двойного дна. В редких случаях балластные цистерны выгораживаются между грузовыми люками или под верхней палубой. Высоко расположенные цистерны забортовой воды позволяют снизить метacentрическую высоту в балластном пробеге, которая обычно в этих условиях плаванием становится чрезмерной.

Малые грузовые суда с машинным отделением, расположенным в средней части, строятся, как правило, без динтак. На больших судах такого типа предусматривают одну или две пары динтак. Их размещают чаще всего по сторонам от коридора гребного вала, что позволяет целесообразно использовать узкие пространства в кормовых трюмах, и, кроме того, в нос или в корму от машинного отделения.

При проектировании грузовых судов с кормовым расположением машинного отделения часто возникает затруднение с удифференткой. Она обусловлена тем, что в районе грузовых трюмов удельная нагрузка, приходящаяся на единицу длины судна, больше, чем в машинном отделении. Поэтому эти суда большей частью нуждаются в более вместительных носовых балластных цистернах для смещения центра тяжести груза в корму. Увеличение емкости балластных цистерн в носовой половине судна позволяет также уменьшить дифферент на корму в балластном пробеге.

Исходя из отмеченных обстоятельств на судах с машинным отделением и кормовой оконечности часто предусматривают динтак, в крайнем носовом трюме в виде динтак-цистерн или цистерн, примыкающих к таранной переборке. Иногда динтак выгораживают под средней надстройкой или рубкой. Вместо установки динтак наряду с ней прибегают также к увеличению длины форпика.

В этой связи следует отметить, что на судах с центральным расположением машинного отделения форпик имеет длину порядка 5% от длины судна. Эта цифра соответствует максимальной длине, допускаемой конструктивными правилами. На грузовых судах максимальная длина этого отсека не регламентируется. По аналогии с пассажирскими судами ее ограничивают пределом в 5% от длины судна плюс 3 м. Актерник обычно делается длиной около 5—6% от длины судна.

Увеличение емкости носовых балластных цистерн оказывает неблагоприятное влияние на некоторые показатели судна. Оно может привести в балластном пробеге к некоторому увеличению изгибающих моментов и к усилению килевой качки, вследствие увеличения момента инерции массы судна относительно поперечной оси.

Цистерны фор- и актерника предназначаются большей частью исключительно для балластировки судна. Прочие же цистерны могут быть часто балластными или топливно-балластными. При наличии соответствующих трубопроводов они могут также использоваться попеременно для приема балласта и перевозки пресной воды, а динтаки могут быть, кроме того, приспособлены для перевозки жидких и сухих коммерческих грузов. В последнем случае предусматривают небольшие грузовые люки с металлическими крышками, позволяющие заполнить эту цистерну. Обычно нагрузку производят из междупалубного пространства.

Топливо обычно образует с остатками забортовой воды густую эмульсию, из которой трудно выделить топливо, так как его удельный вес мало отличается от удельного веса воды. Хотя дизельное топливо, смешанное с водой, лучше поддается сепарации, однако в обоих случаях возникают затруднения при необходимости освободить топливно-балластные цистерны от воды, так как в портах и при подходе к ним выкачка за борт балласта, загрязненного нефтью, запрещена. Поэтому, если это практически возможно, целесообразно отказаться от использования одних и тех же цистерн под топливо и воду. Если же на судне есть балластные и топливно-балластные цистерны, следует заполнить водой в первую очередь чисто балластные цистерны.

На рис. 24 приведены в качестве примера две схемы расположения балластных, топливно-балластных и балластно-грузовых цистерн на грузовом судне.

При полном заполнении цистерн относительный вес балласта, выраженный в процентах от deadweight $P_{\text{дв}}$, возрастает с уве-

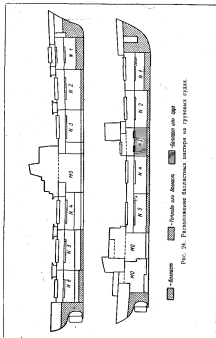


Рис. 24. Расположение балластных цистерн на грузовых судах.

личием размеров судна. В качестве более или менее характерных значений отношения $P_d/P_m = f(P_m)$ для грузовых судов с центральным расположением машинного отделения можно назвать следующие цифры:

P_d/P_m , %	1-3	6-8	> 10
$P_m/1000$	15-20	20-25	25-30

На судах с кормовым расположением машинного отделения и особенно на специализированных судах, обеспеченных грузом лишь на переходы в одном направлении, относительный вес балласта возрастает. Если цистерны, в которые может приниматься заборная вода, целиком заполнены, он выражается в среднем следующими цифрами (в процентах):

при отсутствии дутья	15-20
в одной яре	25-30
на рудовозах	60-80
в нефтовах	100

Значительная вместимость балластных цистерн на специализированных рудовозах объясняется тем, что для перевозки руды, являющейся тяжелым грузом, используется лишь небольшая часть кубатуры корпуса. На нефтовах же для балластировки в обратном рейсе используются грузовые танки.

§ 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОЙ ЕМКОСТИ БАЛЛАСТНЫХ ЦИСТЕРН

Рассмотрим задачу о необходимой емкости балластных цистерн в зависимости от заданного погружения гребного вала и осадки носом в балластном пробеге. Судно будем считать одноконтным с центральным расположением машинного отделения.

Относительную осадку носом в балластном пробеге T_n измеренную в долях осадки судна в полном грузу, будем считать величиной заданной и равной

$$T_n = k_1 T.$$

Рассматривая осадку судна кормой в балластном пробеге T_k как функцию от диаметра гребного вала и степени погружения его в воду, можем написать

$$T_k = ad + k_2 d,$$

где d — диаметр вала, ad — зазор между диском вала и килевой линией, $k_2 d$ — погружение вала. В относительных единицах последняя формула представится в виде

$$\frac{T_k}{T} = (a + k_2) \frac{d}{T}.$$

Относительная средняя осадка и относительное водонизмещение в балластном пробеге найдутся по формулам

$$\frac{T_k}{T} = \frac{A_0}{2} + \frac{a + A_0}{2} \frac{d}{T};$$

$$\frac{D_0}{D} = 1 - \frac{a}{4} \left(1 - \frac{T_k}{T}\right) + \frac{1}{2} \frac{a}{\epsilon} \left(\frac{a}{\epsilon} - 1\right) \left(1 - \frac{T_k}{T}\right)^2,$$

из которых вторая представляет собой модификацию формулы (131), предназначенной для построения грузового размера. Она не учитывает влияния остатков топлива и воды в балластном пробеге и, следовательно, приводит к несколько заниженным результатам при определении количества балласта. С другой стороны, при целиком заполненных цистернах судно обычно получает не вполне подпадающий дифферент. Поэтому цистерны заполняются водой на 85–90%. Оба эти обстоятельства частично уравновешивают друг друга.

Воспользовавшись последней формулой, найдем следующие значения отношения $\frac{D_0}{D} = \frac{T_k}{T}$ в зависимости от отношений a/b и T_k/T

a/b	1,02	1,15	1,18
При $T_k/T = 0,50$	0,91	0,89	0,87
• $T_k/T = 0,55$	0,95	0,91	0,89

В дальнейших расчетах в качестве более или менее характерного соотношения принято

$$\frac{D_0}{D} = 0,9 \frac{T_k}{T}.$$

В табл. 14 приведены значения T_k/T и D_0/D , соответствующие

Таблица 14

Определение относительного водонизмещения в балластном пробеге

Показатели	$d = 0,657$			$d = 0,707$		
A_0	0,70	0,80	0,90	0,70	0,80	0,90
T_k/T	0,50	0,55	0,63	0,54	0,59	0,66
T_k/T	0,50	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
T_k/T	0,45	0,45	0,52	0,47	0,53	0,54
D_0/D	0,40	0,45	0,47	0,42	0,48	0,49

трем значениям коэффициента A_0 при двух характерных отношениях d/T , подсчитанным в предположении, что

$$A_0 = 0,40; \quad a = 0,07.$$

Для грузовых судов с обычными соотношениями между длиной и осадкой отношения L/T не выходят большей частью из пределов $L/T = 15–17$. Поэтому при $T_k/L = 0,025$ имеем $A_0 = 0,375–0,425$

и, следовательно, принятый для иллюстративных расчетов коэффициент $A_0 = 0,40$ соответствует приблизительно минимальным требованиям, которые рационально предъявлять к погружению носа в балластном пробеге. Прямая $T_k/L = 0,03$, мы бы имели $A_0 = 0,45–0,51$, что приближается к верхнему пределу значений этого отношения.

Цифра $a = 0,07$ соответствует толщине пилки астеристения, регламентированной конструктивными правилами Регистра СССР, и общепринятым зазором между диском винта и пилкой.

Табл. 14 показывает, что при принятых предположениях относительное водонизмещение судна в балластном пробеге изменяется в пределах $D_0/D = 0,4–0,5$. При более жестких требованиях к осадке носом ($T_k = 0,48T$) мы получили бы $D_0/D = 0,44–0,53$.

Для построенных судов относительное водонизмещение обычно лежит в пределах $D_0/D = 0,42–0,56$. Ариот [2] рекомендует принимать $D_0/D = 0,5$, мы связывая эту цифру с диаметром винта.

Если относительное водонизмещение судна в балластном пробеге установлено, вес балласта может быть подсчитан как разность между водонизмещением в балластном пробеге и весом судна порожнем по формуле

$$P_0 = D_0 - (1 - \gamma_{\text{вс}})D,$$

где $\gamma_{\text{вс}}$ — коэффициент утилизации водонизмещения по deadweight.

Из последней формулы вытекают следующие соотношения, выражающие относительный вес балласта в долях водонизмещения и deadweight:

$$\frac{P_0}{D} = \gamma_{\text{вс}} - \left(1 - \frac{D_0}{D}\right);$$

$$\frac{P_0}{P_{\text{вс}}} = 1 - \frac{1}{\gamma_{\text{вс}}} \left(1 - \frac{D_0}{D}\right).$$

В табл. 15 относительный вес балласта подсчитан для трех значений D_0/D при коэффициентах утилизации водонизмещения 0,62

Таблица 15

Определение относительного веса балласта

Показатели	$\gamma_{\text{вс}} = 0,62$			$\gamma_{\text{вс}} = 0,72$		
D_0/D	0,45	0,47	0,50	0,45	0,47	0,50
P_0/D	0,07	0,09	0,12	0,17	0,19	0,22
$P_0/P_{\text{вс}}$	0,11	0,15	0,19	0,24	0,26	0,30

и 0,72. Первая цифра характерна для малых, а вторая — для крупных грузовых судов.

Наблюдающееся из практики возрастание отношения $P_0/P_{\text{вс}}$ по мере увеличения размеров судна (см. § 6) можно объяснить тем,

что крупные суда эксплуатируются обычно в более суровых условиях. Кроме того, сказывается увеличение коэффициента усадки при водоземлении, сопутствующее возрастанию размеров судна. При всех прочих равных условиях оказывает влияние и относительный диаметр яхты. На построенных судах эта величина изменяется в широких пределах.

Ниже приводятся пределы значений отношений d/T по судам, рассмотренным в упомянутом докладе Г. Боклера. Данные сгруппированы по типам судов и водоземлениям:

D , м	Углубом	Сухогрузом	Танкером
2500—7000	0,65—0,85	0,70—0,78	0,68—0,78
10000—17000	—	0,66—0,72	0,68—0,78
18000—21000	—	—	0,60—0,60

Статистическими данными, приведенными в настоящем и предыдущем параграфах, можно пользоваться для первоначальной ориентировки в вопросе. При определении же емкости балластных цистерн целесообразно исходить из принятого диаметра яхты, поставленных требований в отношении его погружения и фиксированной осадки носом в балластном пробеге.

Рассматривая вопросы, связанные с балластировкой судна, мы предполагали, что рекомендуемые значения отношений T_d/H и $d_{\text{нр}}/d$ автоматически удовлетворяют требованиям, связанным с дрейфом судна и его управляемостью. Поэтому мы не касались предложенного Г. Боклером критерия — отношения средней осадки судна в балластном пробеге T_d к приведенной высоте борта H_L . Отметим все же, что для сухогрузных судов, рассмотренных Г. Боклером, обратное отношение изменяется в пределах $H_L/T_d = 2,2—3,4$, а для нефтевозов — в пределах $H_L/T_d = 1,7—2,4$.

§ 1. ОБЩЕЕ ПОНЯТИЕ ОБ УРАВНЕНИИ ВЕСОВ

Уравнение весов является аналитическим выражением той интерпретации закона Архимеда, согласно которой водоземление корабля равно сумме всех весов, входящих в его нагрузку. В соответствии с этим в наиболее общей форме оно может быть представлено следующим образом:

$$D = \sum P_i + P, \quad (41)$$

В этом уравнении D — полное или нормальное водоземление. Под P_i мы будем понимать переменные веса, связанные с элементами судна функциональными зависимостями, под P — сумму всех независимых весов, которые рассматриваются как постоянные величины. Каждый из весов P_i является функцией главных размеров и водоземления корабля, коэффициентов, характеризующих его форму, а также различного рода измерителей p_i и практических коэффициентов C_i . Некоторые члены уравнения весов зависят, кроме того, от заданных параметров: скорости хода v , дальности плавания l и т. п.

Допустим, что вес P_i выражается функцией

$$P_i = f_i(\delta, L, B, T, H, p_i, C_i, v, l, \dots).$$

В этом выражении неизвестными являющимися элементами судна δ , L , B , T и H , а измерителями весов p_i , коэффициентами C_i , параметры v и l рассматриваются как заданные величины.

Как это следует из главы третьей, уравнение весов может быть представлено в различных формах в зависимости от разбивки нагрузки на отдельные составляющие и функциональных зависимостей, принятых для того, чтобы выразить каждый из весов P_i . Для выяснения определенности в рассматриваемый вопрос целесообразно в соответствии с принятой ранее разбивкой нагрузки разбить уравнение (41) в виде

$$D = P_n + P_0 + P_s + P_m + P_v + P_c + P_a, \quad (42)$$

где P_k — вес корпуса;
 P_0 — вес бронирования;
 P_a — объединенный вес перевозимого груза и пассажиров или вооружения и боевого запаса;
 P_m — вес механизмов;
 P_T — вес топлива, питательной воды и масла;
 P_c — вес снабжения, расходных материалов, команды, пресной воды и провизии;
 P_d — запас водоизмещения.

В случае необходимости каждый из весов, вошедших в правую часть уравнения (42), может быть разбит более детально.

Если при проектировании гражданских судов задается не чистая грузоподъемность и число пассажиров, а дейдейт P_{am} , то в уравнении (42) следует принять

$$P_{am} = P_a + P_T + P_c,$$

где P_c — вес команды, пресной воды и провизии из раздела «Снабжение».

Для того чтобы упростить написанные уравнения весов, целесообразно объединить в нем члены, выражаемые одинаковыми функциональными зависимостями. Этот вопрос можно решать по-разному, поскольку при конкретизации функциональных зависимостей, связывающих один и те же веса с элементами судна, можно исходить из различных практических формул. В дальнейшем изложении, исходя из соображений, приведенных в главе третьей, мы будем рассматривать P_k и P_0 как независимые веса и объединять их с весом P_a . К этой группе мы будем относить также не зависящие от элементов судна составляющие весов, которые могут войти в функциональные зависимости, выражающие P_m , P_0 , P_k и P_T .

В соответствии с этим мы ограничимся рассмотрением уравнения весов, приведенного к виду

$$D = P_k + P_0 + P_a + P_T + P_c, \quad (43)$$

понимая под

$$P = P_m + P_c + P_a + P_T$$

сумму всех постоянных весов, и в том числе независимых весов q , которые могли войти в функциональные зависимости P_i . Заметим, что принятая интерпретация уравнения весов не ограничивает его общности, поскольку все другие виды функциональных зависимостей, которыми могли бы быть выражены веса P_k и P_0 , практически уже представлены в правой части уравнения (43). Таким образом, математическая сущность задачи не изменилась бы, если при объединении весов мы исходили бы из каких-либо других принципов.

* Почему мы в дальнейшем будем обозначать под P_k , P_0 , P_m , P_T составляющие весов корпуса, бронирования, механизмов и топлива, которые рассматриваются как функции, зависящие от элементов судна.

§ 2. УРАВНЕНИЕ ПЛАВУЧЕСТИ

Воспоминание судна D в левой части уравнения (43) определяется формулой

$$D = \gamma \Delta B T, \quad (44)$$

которая рассматривается как уравнение плавучести. В теории проектирования судов применяются следующие его модификации:

$$\left. \begin{aligned} l_k &= \frac{l}{D^{\frac{1}{3}}} = \left[\frac{1}{\gamma^{\frac{1}{3}}} \left(\frac{l}{\delta} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{B}{T} \right]^{\frac{1}{3}}; \\ b_0 &= \frac{b}{D^{\frac{1}{3}}} = \left[\frac{1}{\gamma^{\frac{1}{3}}} \left(\frac{l}{\delta} \right)^{-\frac{1}{3}} \frac{B}{T} \right]^{\frac{1}{3}}; \\ l_0 &= \frac{T}{D^{\frac{1}{3}}} = \left[\frac{1}{\gamma^{\frac{1}{3}}} \left(\frac{l}{\delta} \right)^{-1} \left(\frac{B}{T} \right)^{-2} \right]^{\frac{1}{3}}. \end{aligned} \right\} \quad (45)$$

Эти соотношения могут быть также представлены в безразмерном виде:

$$\begin{aligned} l &= \frac{l}{V^{\frac{1}{3}}} = \left[\frac{1}{\delta} \left(\frac{l}{B} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{B}{T} \right]^{\frac{1}{3}} = \gamma^{\frac{1}{3}} l_0; \\ b &= \frac{b}{V^{\frac{1}{3}}} = \gamma^{\frac{1}{3}} b_0; \\ t &= \frac{T}{V^{\frac{1}{3}}} = \gamma^{\frac{1}{3}} t_0. \end{aligned}$$

где V — объемное водоизмещение;

γ — удельный вес воды.

Параметры l , b , t и l_0 , b_0 , t_0 , которые иногда входят в уравнение весов, называются относительной длиной, относительной шириной и относительной осадкой. Из них первые три величины представляют собой безразмерные выражения, а три остальные относятся к весовому водоизмещению.

Относительная длина является важной характеристикой формы судна, используемой при систематизации экспериментальных данных по сопротивлению воды и в практических расчетах остаточного

сопротивления. Относительная ширина и относительная осадка используются главным образом как параметры при статистическом изучении соотношений элементов построенных судов. Кроме того, наряду с относительной длиной они фигурируют в некоторых формулах, используемых при проектировании судов.

Интересно отметить, что значения L , B , T , подсчитываемые для какого-либо судна, равны длине, ширине и осадке геометрически подобного ему судна с водоизмещением, равным 1 м^3 .

Часто бывает удобно пользоваться уравнением плавучести в дифференциальной форме. Оно может быть получено путем дифференцирования в частных производных алгебраического уравнения плавучести в предположении, что δ , L , B , T являются независимыми переменными. В этом случае полный дифференциал функции D представляется в виде

$$dD = \frac{\partial D}{\partial \delta} d\delta + \frac{\partial D}{\partial L} dL + \frac{\partial D}{\partial B} dB + \frac{\partial D}{\partial T} dT.$$

Частная производная от водоизмещения по коэффициенту общей полноты равна

$$\frac{\partial D}{\partial \delta} = \gamma L B T = \frac{D}{\delta}.$$

Определив аналогично другие производные, можно представить дифференциальное уравнение плавучести в виде

$$\frac{dD}{D} = \frac{d\delta}{\delta} + \frac{dL}{L} + \frac{dB}{B} + \frac{dT}{T}. \quad (46)$$

В задачах, которые могут быть решены при помощи уравнения (46), малые конечные приращения элементов δ , L , B и T рассматриваются приближенно как дифференциалы этих величин. Если ограничиться рассмотрением лишь геометрических соотношений, без учета общего баланса нагрузки, уравнение (46) позволяет определить, насколько необходимо изменить размеры рассматриваемого судна для того, чтобы увеличить его водоизмещение на заданную величину.

Так, например, если

$$\begin{aligned} d\delta &= 0; \\ \frac{dL}{L} &= \frac{dB}{B} = \frac{dT}{T} = 0,1, \end{aligned}$$

то в соответствии с формулой (46)

$$\frac{dD}{D} = 0,3$$

и, следовательно,

$$\frac{D + dD}{D} = 1 + \frac{dD}{D} = 1,3,$$

Точный расчет в этом случае дает

$$\frac{D + dD}{D} = 1,3^3 = 1,33,$$

и, таким образом, погрешность приближенного расчета оказывается равной 2,3%. Следует отметить, что изменение главных размеров судна на 10% считается предельным при использовании уравнения плавучести в уравнении весов в дифференциальной форме.

§ 3. КЛАССИФИКАЦИЯ УРАВНЕНИЙ ВЕСОВ

В зависимости от вида использованных функциональных зависимостей мы будем различать в дальнейшем уравнения весов, выраженных в функции главных размеров и коэффициента общей полноты, и уравнения весов, выраженных в функции водоизмещения. Разнообразием уравнений первой группы являются уравнения весов, выраженных либо в функции водоизмещения и соотношений главных размеров, либо в функции водоизмещения и относительных главных размеров.

Уравнениями первой группы с их разновидностями пользуются большей частью в тех случаях, когда элементы судна определяются в ряде вариантов, отличающихся соотношениями главных размеров и коэффициентом общей полноты. При определении элементов проектируемого судна методом последовательных приближений удобно пользоваться уравнениями второй группы или упрощенными уравнениями первой группы, например рассмотренным ниже уравнением (56).

В зависимости от постановки задачи уравнения обеих групп делят на алгебраические и дифференциальные. Алгебраические уравнения позволяют непосредственно определить элементы судна, соответствующие заданной грузоподъемности, скорости хода и району плавания. Дифференциальные уравнения позволяют определить, как отразятся на элементах судна-прототипа заданные изменения грузоподъемности, скорости хода и района плавания или численных значений измерителей и коэффициентов, входящих в уравнение весов.

Во многих случаях применение дифференциальных уравнений позволяет упростить решение уравнения весов.

§ 4. УРАВНЕНИЕ ВЕСОВ, ВЫРАЖЕННЫХ В ФУНКЦИИ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ СУДА

Если в исходном уравнении весов (43) выразить отдельные веса в функции главных размеров и коэффициентов теоретического чертежа, оно приводится к виду

$$\gamma L B T = \sum f_i(\delta, L, B, T, H, \dots) + \varphi(N) + P. \quad (47)$$

В формуле (47) функция $\varphi(N)$ объединяет веса механизмов и полтяка, зависящие от мощности механизмов N и заданной дальности плавания.¹ Эта функция входит в уравнение (47) отдельным членом, так как ниже рассматриваются случаи, когда мощность механизмов выражена либо аналитически, либо с помощью графиков или таблиц. Следует подчеркнуть, что с помощью графиков или таблиц могут быть выражены не только выделенные в качестве примера веса, но и любые другие веса, вошедшие в рассматриваемое уравнение.

Уравнение (47) содержит несколько неизвестных величин в виде главных размерений судна, коэффициентов теоретического чертежа и мощности механизмов. Для того чтобы решить это уравнение, необходимо задаться дополнительными соотношениями, вытекающими из других уравнений теории проектирования судов или выработанных соотношений элементов проектируемого судна. В частности, это могут быть следующие соотношения:

$$\frac{L}{B} = m; \quad \frac{B}{T} = n; \quad \frac{H}{T} = k; \quad t = t_0,$$

причем, когда предполагается исследовать влияние изменения элементов судна на его качества, задача решается для нескольких значений m , n , k , t_0 .

Введя подобные дополнительные условия, можно выразить неизвестные в уравнении (47) через один из элементов судна. Как это показано ниже, при решении этого уравнения может оказаться необходимым определить ряд значений числа Фруда и Рейнольдса, соответствующих пробным значениям искомой величины. В подобных случаях для упрощения решения удобно выразить неизвестные в исходном уравнении через длину судна, после чего получим

$$\Sigma F_i(L) + \varphi(N) + P = 0, \quad (48)$$

К решению уравнения (48) можно подойти двояко, в зависимости от принятого способа определения мощности механизмов. Если мощность механизмов выражена какими-либо приближенными формулами в функции элементов судна, то уравнение (48) приводится к виду

$$\Sigma f_i(L) + P = 0, \quad (49)$$

которое легко решается одним из общеизвестных приемов.

Решение уравнения (48) несколько усложняется, если функция $\varphi(N)$ выражена графиками или табулированными функциями. Допустим, что при помощи графиков или таблиц сопоставление движения судна, в следовательно, и мощности механизмов могут быть

¹ Для упрощения изложения формула не рассматривается пока случаи, когда зависимость возникает не от полной мощности механизмов, а от мощности, соответствующей экономической скорости хода.

выражены через элементы судна и числа Рейнольдса и Фруда зависимость

$$N = \varphi_0(\beta, L, B, T, \dots, Re, Fr), \quad (50)$$

которая приводится к виду

$$N = \varphi(L, Re, Fr). \quad (51)$$

В этом случае уравнение (48) решается графически, для чего необходимо задаться рядом значений L . Далее, исходя из заданной скорости хода, для каждого частного значения L подсчитываются числа Фруда и Рейнольдса и по формуле (51) определяется соответствующая мощность механизмов. После этого остается лишь построить график изменения функции

$$\Sigma F_i(L) + f(N) + P.$$

Частное значение L , обращающее эту функцию в нуль, будет искомым корнем уравнения (48).

После определения длины судна, находят другие главные размеры и с помощью принятых функциональных зависимостей $P_i = f_i$ подсчитывают отдельные веса и составляют таблицу нагрузок. Если сумма весов не сходится с заданным значением это свидетельствует о допущенной ошибке.

Остановимся теперь на двух удобных модификациях уравнения весов, выраженных в функции главных размеров.

После подстановки

$$L = L_0 D^{\frac{1}{3}};$$

$$B = b_0 D^{\frac{1}{3}};$$

$$T = t_0 D^{\frac{1}{3}};$$

$$H = T \frac{H}{T} = t_0 D^{\frac{1}{3}} \frac{H}{T}$$

уравнение (47) может быть приведено к виду

$$\Sigma f_i(D, \beta, b_0, t_0, \frac{H}{T}) + \varphi(N) + P = 0, \quad (52)$$

Если мы подставим в последние уравнение размеренные значения L_0 , b_0 , t_0 по формулам (45), оно может быть преобразовано следующим образом:

$$\Sigma f_i(D, \beta, \frac{L}{B}, \frac{B}{T}, \frac{H}{T}) + \varphi(N) + P = 0. \quad (53)$$

Оба эти уравнения решаются относительно взаимозависимых, причем входящие в них безразмерные соотношения элементов рассматриваются как заданные величины. Уравнением (53) удобно пользоваться при исследовании вопроса о влиянии соотношений главных размеров и коэффициентов теоретического чертежа на подвешивание судна и мощность механизмов. В некоторых случаях целесообразно сохранять в уравнении весов высоту борта, не выражая ее через взаимозависимые и безразмерные соотношения элементов.

Используя уравнение весов, составленное в функции главных размеров судна, можно получить относительно точные результаты, если нагрузка детализируется таким образом, что для отдельных весов оказывается возможным выбрать наиболее подходящие функциональные зависимости. В отдельных случаях сопротивление воды движению судна должно быть выражено с помощью графиков или таблиц, поскольку точность формул, выражающих сопротивление, недостаточна.

Вследствие отмеченного прикладного преимущества рассмотренной наиболее общей формы уравнения весов, подобные уравнения используются для анализа вопроса о влиянии изменения элементов проектируемого судна на его качества. В предварительных же расчетах, когда нет оснований стремиться к особенно большой точности результатов, обычно отдают предпочтение менее точным, но зато и менее трудоемким способам решения задачи.

Когда при составлении уравнения весов в функции главных размеров используются укрупненные измерители, причем мощность выражается аналитически, уравнение принимает настолько простой вид, что решение его не связано с какими-либо затруднениями.

В качестве простейшего примера рассмотрим уравнение весов, составленное для грузового судна в предположении, что заданными величинами являются дейдвейт $P_{\text{дв}}$ и скорость хода v . Считая, что вес корпуса пропорционален кубическому модулю, и выразив мощность механизмов формулой адмиралтейских коэффициентов, мы приходим к уравнению

$$D = g_k L B H + p_k \frac{D^{\frac{2}{3}} v^3}{C} + P_{\text{дв}}, \quad (54)$$

которое может быть также представлено следующим образом:

$$\gamma L B T = g_k L B H + p_k \frac{v^3}{C} (\gamma L B T)^{\frac{2}{3}} + P_{\text{дв}}, \quad (55)$$

Уравнение (55), содержащее пять неизвестных величин γ , L , B , T , H , может быть решено, если мы зададимся, как и в рассмотренном ранее случае, четырьмя дополнительными условиями. Проще

однако, представить уравнение (54) в виде

$$D \left(1 + \frac{g_k}{\gamma^{\frac{2}{3}}} \frac{H}{T} \right) - p_k \frac{D^{\frac{2}{3}} v^3}{C} - P_{\text{дв}} = 0 \quad (56)$$

и определять предварительно взаимозависимые для заданных значений γ и $\frac{H}{T}$. После этого, в соответствии с принятыми дополнительными условиями, легко определяются и другие элементы судна.

Подстановка в $y = D^{\frac{1}{3}}$ уравнение (56) приводит к кубическому уравнению.

§ 5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УРАВНЕНИЯ ВЕСОВ, ВЫРАЖЕННЫХ В ФУНКЦИИ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ, ДЛЯ РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ СУДНА ПО ПРОТОТИПУ

Часто в процессе разработки проекта ставится задача определить, как следует изменить элементы судна-прототипа для того, чтобы компенсировать заданные изменения известных весов, скорости хода или района плавания. Обычно такая задача решается дифференциальным методом, однако она может быть решена более точно алгебраическим путем за счет некоторого упрощения выкладок. Задача, рассмотренная в настоящем параграфе, представляет интерес и с методической точки зрения, так как в этом примере можно убедиться, что между уравнениями весов и дифференциальной и алгебраической формы нет принципиальной разницы.

Отметим напомним нуль элементом, относящимся к прототипу, и обозначим

$$\begin{aligned} \bar{v} &= v : v_0; & \bar{k} &= k : k_0 \\ \bar{t} &= t : t_0; & \bar{\gamma} &= \gamma : \gamma_0 \\ \bar{b} &= B : B_0; & \bar{r} &= r : r_0 \\ \bar{t} &= T : T_0 \end{aligned}$$

выражен веса, входящие в нагрузку, в виде функций

$$P_i = (P_i)_0 f_i(\bar{b}, \bar{t}, \bar{b}, \bar{t}, \bar{k}, \bar{r}, \bar{\gamma}),$$

а взаимозависимые судна — зависимостями

$$D = D_0 \bar{D} f(\bar{b}, \bar{t}, \bar{b}, \bar{t}, \bar{k}, \bar{r}, \bar{\gamma}).$$

После этого исходное уравнение весов представится следующим образом:

$$D_0 \bar{D} f = \Sigma (P_i)_0 f_i + P, \quad (57)$$

где неизвестными величинами являются $\bar{b}$, $\bar{t}$, $\bar{b}$, $\bar{t}$, $\bar{k}$, $\bar{r}$, $\bar{\gamma}$.

Как и в предыдущем случае, для решения уравнения (57) необходимо задать четырем дополнительным условиям, связывающим пять неизвестных величин.

§ 4. ЧИСЛЕННЫЙ ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УРАВНЕНИЯ ВЕСОВ, ВЫРАЖЕННЫХ В ФУНКЦИИ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРЕНИЙ СУДНА

В качестве примера рассмотрим задачу определения элементов грузоподъемного судна, для которой заданы:

Вес перевозимого груза	$P_g = 10000 \text{ т}$
и забитости в козла	$\frac{P_g}{P_c} = 110 \text{ т}$
Скорость хода	$v = 18 \text{ узлов}$
Дальность плавания	$S = 1000 \text{ миль}$

Для того чтобы не перегружать изложение данными вычислениями, разобьем нагрузку на относительно небольшое число стоек, используем наиболее простые зависимости веса от главных размерений.

Вес корпуса в соответствии с формулами, приведенными в предыдущей главе, будем рассматривать состоящим из веса стального корпуса $P_{ст}$ и веса оборудования $P_{об}$. Таким образом,

$$P_k = P_{ст} + P_{об}$$

Вес стального корпуса выразим через главные размерения формулой

$$P_{ст} = g_{ст} A_1 A_2 A_3 \delta^{\frac{1}{3}} \left(\frac{L}{H} \right)^{\frac{1}{3}} L B N_2,$$

а вес оборудования — формулой

$$P_{об} = g_{об} (L B H)^{\frac{2}{3}}.$$

Вес механизмов и топлива выразим через мощность, необходимую для движения судна с заданной скоростью, и через измеренный вес механизмов и топлива формулой

$$P_M + P_T = \left(P_M + 1,1 P_T \frac{r}{v} \right) N,$$

в которой коэффициент 1,1 учитывает морской запас.

После суммирования весов, составляющих водоизмещение, уравнение веса приобретает вид

$$D = g_{ст} A_1 A_2 A_3 \delta^{\frac{1}{3}} \left(\frac{L}{H} \right)^{\frac{1}{3}} L B N_2 + g_{об} (L B H)^{\frac{2}{3}} + \left(P_M + 1,1 P_T \frac{r}{v} \right) N + P_{гс} + P_c + P_{\text{зап}}$$

Принимая запас водоизмещения равным $P_{\text{зап}} = 300 \text{ т}$ и выразив водоизмещение через главные размерения, получим

$$\begin{aligned} 74,87 &= g_{ст} A_1 A_2 A_3 \delta^{\frac{1}{3}} \left(\frac{L}{H} \right)^{\frac{1}{3}} L B N_2 + g_{об} (L B H)^{\frac{2}{3}} + \\ &+ \left(P_M + 1,1 P_T \frac{r}{v} \right) N + 10000 + 110 + 300. \end{aligned}$$

Для устранения неопределенности задачи зададим значения соотношений главных размерений и коэффициентов общей системы

$$\frac{L}{B} = 7,5; \quad \frac{B}{T} = 2,5; \quad \frac{H}{T} = 1,48; \quad \frac{L}{H} = 12,7; \quad \frac{N_2}{N} = 1,05; \\ \delta = 0,65.$$

Зная эти значения, выразим все размерения, входящие в уравнение веса, через длину L . При этом вытекающие в уравнении весов измерения и численные коэффициенты примем в соответствии с протоколом и согласно указаниям, содержащимся в третьей главе, равными:

$$\begin{aligned} g'_{ст} &= 0,0239; & g_{об} &= 1,05; \\ A_1 &= 0,96; & P_M &= 60 \text{ кз/а. с.}; \\ A_2 &= 1,12; & P_T &= 0,285 \text{ кз/а. с.}; \\ A_3 &= 1,00; & \gamma &= 1,025. \end{aligned}$$

После подстановки численных значений соотношений элементов, измерений и коэффициентов уравнение веса принимает вид

$$\Phi = 0,0071 L^3 - 0,0506 L^2 - 0,263 L - 10483 = 0. \quad (56)$$

Найдем численную возможность по графикам 38а и впрямь при определении мощности механизмов значение общего прудельского коэффициента равным $\gamma_0 = 0,65$, зададим рядом значений длины L . Для каждого значения L определим N и подставим значение левой части уравнения (56). Расчеты сведены в табл. 16, в которой строки 4—14 относятся к расчету буксировочной мощности по 38а.

По результатам расчетов, приведенных в таблице, путем построения кривой Φ в функции длины было найдено значение L , обращающее левую часть уравнения (56) в нуль. Это значение $L = 157,6 \text{ м}$ и является решением уравнения веса. Остальные размерения судна определялись по известным соотношениям главных размерений:

$$B = \frac{L}{\left(\frac{L}{B} \right)} = 21,0 \text{ м}; \quad T = \frac{B}{\left(\frac{B}{T} \right)} = 8,4 \text{ м}; \quad H = T \frac{H}{T} = 12,45 \text{ м}.$$

Водоизмещение судна

$$D = 74,87 = 1,025 \cdot 0,65 \cdot 157,6 \cdot 21,0 \cdot 8,4 = 18800 \text{ т}.$$

По найденным главным размерениям и по зависимостям, использованным при составлении уравнения веса, подсчитывались веса в тоннах по разному нагружению

$$\begin{aligned} P_{ст} &= 4300; \\ P_{об} &= 1250; \\ P_M &= 670; \\ P_T &= 2280; \\ P_g &= 110; \\ P_{гс} &= 10000; \\ P_{\text{зап}} &= 300; \end{aligned}$$

$$D = \Sigma P = 18780 \approx 18800 \text{ т}$$

№ з. п.	Обозначение величины	При длине судна, м			
		140	150	160	170
1	ν	18	18	18	18
2	$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}}$	0,262	0,243	0,234	0,227
3	$t_g = \left[\frac{1}{2h} \left(\frac{L}{\delta} \right)^2 \frac{B}{T} \right]^{\frac{1}{2}}$	5,91	5,91	5,91	5,91
4	C_2	414	420	426	436
5	$b_0 = 1,08 - 1,58 Fr$	0,66	0,68	0,69	0,70
6	$\Delta_1 = \frac{b - b_{cr}}{100} C_1$	0	6	9	14
7	$C_3 + \Delta_1$	414	426	437	449
8	$\Delta_2 = -0,18 (C_1 + b_0) \left(\frac{B}{T} - 2,0 \right)$	-13	-14	-14	-15
9	$C_1 + \Delta_2 + \Delta_1$	401	412	423	434
10	Δ_3	0	0	0	0
11	Δ_4	0	0	0	0
12	$C_2 = C_3 + \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4$	401	412	423	434
13	$D = \left(\frac{L}{b_0} \right)^2$	13 300	15 300	19 766	23 800
14	$W_2 = \frac{D^2 M_1 \nu^2}{C_2}$	6340	6810	7280	6270
15	$N = \frac{W_2}{\nu_0}$	9320	10 000	11 530	12 180
16	$(P_n + P_0) = \left(p_n + 1,1 p_0 \frac{r}{\delta} \right) N$	2450	2630	2920	3200
17	$0,0037 L^3 - 0,0005 L^2$	9090	11 360	13 800	16 800
18	$(17) - (16) - 10 493 = \Phi$	-3700	-2580	+530	+3240

§ 7. ЧИСЛЕННЫЙ ПРИМЕР АЛГЕБРАИЧЕСКОГО ПЕРЕЧИСЛА ЭЛЕМЕНТОВ СУДА ПО ПРОТОТИПУ

В качестве прототипа используем судно, элементы которого были определены в предыдущем параграфе. Таким образом, элементами прототипа являются:

$$\begin{aligned} D &= 18 800 \text{ м}; & H &= 12,45 \text{ м}; \\ L &= 157,6 \text{ м}; & t &= 0,06; \\ B &= 21,6 \text{ м}; & N &= 10 500 \text{ л. с.}; \\ T &= 8,4 \text{ м}; & P_{TP} &= 10 000 \text{ м.} \end{aligned}$$

Допустим, что у проектируемого судна скорость и дальность плавания остаются такими же, как у прототипа, а грузоподъемность уменьшена на 1000 м и составляет $P_{TP} = 9000 \text{ м}$.

Определим главные размеры проектируемого судна в предположении, что его осадка должна быть ограничена величиной $T = 8 \text{ м}$, а коэффициент обойл должен быть увеличен до $\lambda = 0,55$. Отношения $\frac{L}{B}$ и $\frac{H}{T}$ сохраняем такими же, как у прототипа.

Выразим жесткость механизмов и уравнение весов, составленное в предыдущем параграфе, через главные размеры, с помощью формулы Адамс-Вейсбаха коэффициентов получим

$$\begin{aligned} 2 \Delta L T &= \lambda_{cr} A_1 A_2 A_3 b^{\frac{2}{3}} \left(\frac{L}{H} \right)^{\frac{1}{2}} L B H_1 + \lambda_{os} (L B H)^{\frac{2}{3}} + \\ &+ \left(p_n + 1,1 p_0 \frac{r}{\delta} \right) \frac{(\gamma L B T)^{\frac{2}{3}} \nu^2}{C} + 9410. \end{aligned}$$

Пользуясь обозначениями § 5 и данными по нагрузке судна-прототипа, представим написанное уравнение в виде

$$\begin{aligned} 10 800 \text{ м} &= 4200 \frac{1}{L^2} \Delta h^{\frac{1}{2}} + 1250 \frac{1}{b^2} \delta^{\frac{2}{3}} A^{\frac{1}{2}} + \\ &+ 2920 \frac{1}{L^2} \delta^{\frac{2}{3}} b^{\frac{2}{3}} L^{\frac{1}{2}} + 9410. \end{aligned}$$

Сократив все члены на 10^3 , получим

$$\begin{aligned} 10,80 \text{ м} &= 4,2 \frac{1}{L^2} \Delta h^{\frac{1}{2}} + 1,25 \frac{1}{b^2} \delta^{\frac{2}{3}} A^{\frac{1}{2}} + \\ &+ 2,92 \frac{1}{L^2} \delta^{\frac{2}{3}} b^{\frac{2}{3}} L^{\frac{1}{2}} + 9,41. \end{aligned}$$

В последнем уравнении пять неизвестных: b, L, δ, t, N . Дополнительными уравнениями для определения их являются зависимости, выражающие

сформулированные выше условия, которым должны удовлетворять элементы проектируемого судна:

$$i = \frac{8,0}{T_0} = \frac{8,0}{8,4} = 0,953;$$

$$i = \frac{0,58}{b_0} = \frac{0,58}{0,56} = 1,03.$$

Кроме того, исходя из условий

$$\frac{H}{T} = \frac{H_0}{T_0}; \quad \frac{L}{\Delta} = \frac{L_0}{\Delta_0}$$

следует, что

$$h = i = 0,953;$$

$$i = h.$$

После подстановки в правые части полученных соотношений в уравнение

$$18,50 - 4,16i^2 - 4,10i^3 - 9,41 = 0,$$

решая которое, получим

$$i = 0,97.$$

Таким образом, определяем величины, на которые следует умножить элементы прототипа для определения элементов проектируемого судна, оканчиваются данными:

$$i = \frac{L}{L_0} = 0,97; \quad h = \frac{B}{B_0} = 0,97; \quad i = \frac{T}{T_0} = 0,953;$$

$$h = \frac{H}{H_0} = 0,953; \quad i = \frac{\Delta}{\Delta_0} = 1,03.$$

В соответствии с этими цифрами элементы проектируемого судна определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} L &= 153 \text{ м}; & b &= 0,58; \\ B &= 20,4 \text{ м}; & D &= 17300 \text{ м}^3; \\ T &= 8,0 \text{ м}; & N &= 10000 \text{ л. с.} \\ H &= 11,8 \text{ м}; \end{aligned}$$

Нагрузка проектируемого судна в тоннах с помощью использованных выше формул определяется в следующем виде:

$$\begin{aligned} P_{\text{ст}} &= 3880; \\ P_{\text{св}} &= 1200; \\ P_{\text{м}} &= 640; \\ P_{\text{т}} &= 2140; \\ P_{\text{с}} &= 130; \\ P_{\text{г}} &= 9000; \\ P_{\text{д}} &= 300. \end{aligned}$$

$$D = \Sigma P = 17540 \approx 17300$$

§ 3. УРАВНЕНИЕ ВЕСОВ, ВЫРАЖЕННЫХ В ФУНКЦИИ ВОДОЗМЕЩЕНИЯ

Уравнение весов, выраженных в функции водоизмещения судна

$$D = \Sigma f_i(D) + P,$$

является частным случаем рассмотренного ранее более общего уравнения весов, выраженных в функции главных размеров судна. Оно не отличается большой точностью, в частности не может отразить влияние изменения соотношений между элементами судна на его водоизмещение. Практически, однако, если измерители отдельных весов установлены на основе подходящего по конструкции и соотношениям элементов прототипа, рассмотренное уравнение приводит к достаточно точным результатам при определении элементов проектируемого судна в первом приближении.

Требование выразить все переменные веса в функции одного лишь водоизмещения и заданных величин ограничивает число зависимостей, которые могут быть использованы при составлении уравнения весов. Как правило, принято считать, что вес корпуса пропорционален водоизмещению, вес механизмов — мощности, а вес топлива — продолжительности плавания и мощности механизмов, соответствующей полной или экономической скорости хода.¹ Часто исходят также из предположения, что вес бронирования пропорционален водоизмещению, однако, как это было отмечено в предыдущей главе, правильно считать, что вес бронирования пропорционален водоизмещению и степени две трети и коэффициенту, характеризующему среднюю толщину бронирования.

Исходя из отмеченных ранее соображений, вес снабжения и запаса водоизмещения рассматриваются и в настоящем случае как постоянные веса. Можно было бы, однако, исходить из других допущений, считая, например, что P_1 и P_2 пропорциональны водоизмещению. Это не изменило бы принципиальной структуры уравнения весов, которое может быть написано следующим образом:

$$D = p_1 D + p_2 D^{\frac{2}{3}} + p_3 N + k p_4 N^{\frac{1}{3}} + P, \quad (59)$$

однако в этом случае под p_1 следовало бы понимать суммарный коэффициент веса корпуса, снабжения и запаса водоизмещения.

При решении уравнения (59) также могут встретиться два случая, в зависимости от принятого способа определения мощности механизмов. Если мощность механизмов определяется при помощи каких-либо графиков или таблиц, решение осложняется, так как коэффициент сопротивления ζ является функцией элементов судна и параметров, которые не содержатся в уравнении (59).

¹ Как это уже отмечалось в третьей главе, по экономической скорости хода обычно исчисляются запасы топлива только военными кораблями.

Допустим, например, что при определении мощности механизмов N и N_0 при помощи графиков или таблиц используются зависимости вида

$$N = \zeta \varphi(D); \\ \zeta = \varphi\left(\frac{\lambda}{\rho}, l, \frac{B}{T}, Fr, Re\right). \quad (60)$$

В подобных случаях для того, чтобы решить уравнение (59), необходимо заранее выбрать некоторые соотношения элементов или рассмотреть задачу при нескольких комбинациях таких соотношений. При этом уравнение (59) решается графически, для чего необходимо задаться рядом значений подомещения. Для каждого подомещения, исходя из выбранного значения относительной длины l , определяется длина судна

$$L = l_0 D^{\frac{1}{3}}.$$

После этого для каждого частного значения длины судна и заданной скорости хода определяются соответствующие числа Фруда Fr и Рейнольдса Re , а также коэффициенты сопротивления ζ и мощность механизмов N .

Таким образом определяются все необходимые данные для построения кривой изменения функции

$$D = \sum f_i(D) - P$$

в зависимости от D . Значение D , при котором эта функция обращается в нуль, будет искомым корнем уравнения весов.

Рассматриваемый способ решения задачи связан с относительно кропотливыми выкладками. Между тем уравнение весов, заданных в функции подомещения, используется при определении элементов судна в первом приближении. Это дает основание упростить задачу, выражая мощность механизмов наиболее простыми приближенными формулами. Обычно для этой цели используется формула адмиралтейских коэффициентов или другие формулы такого же типа.

Постоянный коэффициент этих формул, в которых мощность механизмов выражается в зависимости от одного лишь подомещения и в скорости хода, является в действительности функцией числа Фруда, коэффициентов теоретического чертежа, соотношений главных размерений и других параметров. Поэтому, следуя таким путем, можно получить достаточно надежные результаты лишь в том случае, когда для определения постоянного коэффициента в используемых формулах имеются систематизированные данные о судах подходящего типа.

Если мощность механизмов выражена формулой адмиралтейских коэффициентов, уравнение (59) принимает вид

$$(1 - p_0) D - p_0 D^{\frac{2}{3}} - p_n \frac{D^{\frac{2}{3}} v^2}{C} - k p_n \tau_0 \frac{D^{\frac{2}{3}} v^2}{C_1} - P = 0. \quad (61)$$

Подстановкой $y = D^{\frac{1}{3}}$ уравнение (61) приводится к кубическому уравнению.

Для упрощения расчетов часто исключают из уравнения (61) экономическую скорость хода, исходя из предположения, что адмиралтейские коэффициенты C и C_1 при полной и экономической скорости хода сохраняют одинаковые значения и, следовательно,

$$N_0 = N \left(\frac{v_0}{v} \right)^3.$$

Такая подстановка не приводит к существенной экономии времени, затрачиваемого на расчеты, и в то же время противоречит действительным соотношениям. Поэтому целесообразно определять коэффициент C , тем же способом, что и коэффициент C_1 . Во всяком случае следует иметь в виду, что зависимость

$$N_0 = N \left(\frac{v_0}{v} \right)^{3.5}$$

приводит для большинства судов к лучшим результатам, чем предположение о эквивалентности адмиралтейского коэффициента, если при определении мощности механизмов не учитывается дополнительное сопротивление, вызванное встречным ветром. Влияние встречного ветра в процентном отношении оказывается сильнее при экономической скорости хода, что отчасти оправдывает допущение о неэквивалентности адмиралтейского коэффициента.

При проектировании транспортных судов можно ввести в уравнение (59) вместо формулы адмиралтейских коэффициентов формулу В. В. Давыдова

$$N = \frac{D^{0.5} v^{2.5}}{C_1},$$

поскольку для этих судов коэффициент C_1 более стабилен, чем коэффициент C . Исключая в этом случае из нагрузки вес бронирования и принимая $N = N_0$; $v = v_0$, мы приходим к следующему уравнению весов:

$$(1 - p_0) D - (p_n + k p_n \tau_0) \frac{D^{0.5} v^{2.5}}{C_1} - P = 0. \quad (62)$$

Уравнение (62) после подстановки $y = D^{0.5}$ приводится к квадратному уравнению.

В заключение уместно отметить, что в практике проектирования судов часто оперируют измерителем веса корпуса, отнесенным к кубическому модулю, который, как это уже отмечалось, связан с измерителем ρ_k соотношением

$$\rho_k = \frac{g_k N}{167}.$$

После подстановки значения ρ_k формулы (59), (61) и (62) принимают более рациональный вид. Одна из формул подобного типа уже была приведена в § 4 при рассмотрении уравнения весов, заданных в функции главных размеров.

§ 9. УРАВНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УТИЛИЗАЦИИ ВОДОЗМЕЩЕНИЯ

Коэффициентом утилизации водозмещения по чистой грузоподъемности называется отношение веса коммерческого груза или оборудования к весовому водозмещению. Коэффициентом утилизации водозмещения по действию называется отношение действия к весовому водозмещению.

В настоящем параграфе мы будем понимать под коэффициентом утилизации водозмещения отношение суммы независимых весов к водозмещению

$$\eta = \frac{P}{D}.$$

Выкладки, связанные с решением уравнения весов, выраженных в функции водозмещения, несомненно упрощаются, если искомое водозмещение заменяется коэффициентом утилизации. Для получения уравнения (61) в новой модификации достаточно разделить его почленно на водозмещение, после чего оно переписывается следующим образом:

$$\eta = 1 - \rho_k - \rho_{\text{ос}} \frac{1}{D^{\frac{1}{3}}} - \rho_k \frac{3}{C} \frac{1}{D^{\frac{1}{3}}} - k \rho_k \tau_k^{\text{ин}} \frac{k_2^2}{C_2} \frac{1}{D^{\frac{1}{3}}}.$$

Выражая в полученной формуле водозмещение через коэффициент η и вес P , приходим к искомому уравнению

$$\eta = 1 - \rho_k - \rho_{\text{ос}} \frac{1}{P^{\frac{1}{3}}} - \rho_k \frac{3}{C} \frac{1}{P^{\frac{1}{3}}} - k \rho_k \tau_k^{\text{ин}} \frac{k_2^2}{C_2} \frac{1}{P^{\frac{1}{3}}} \quad (63)$$

в котором единственной неизвестной величиной является коэффициент утилизации водозмещения.

Аналогично уравнение (62) приводится к виду

$$\eta = 1 - \rho_k - \frac{1}{C_2} (\rho_k + k \rho_k \tau_k) v^{\frac{1.25}{1.2}} \frac{1}{P^{\frac{1}{2}}}. \quad (64)$$

Учитывая, что мощность механизмов N связана с сопротивлением воды движению судна R соотношением

$$N = \frac{0.514 R v}{75 \eta_1},$$

где η_1 — суммарный пропульсивный коэффициент, можно по аналогии с уравнениями (63) и (64) переписать уравнение (59) следующим образом:

$$\eta = 1 - \rho_k - \rho_{\text{ос}} \frac{1}{P^{\frac{1}{3}}} - \left(\frac{1}{146} \right) \frac{\rho_k}{\eta_1} \frac{R}{D} v - \frac{k}{146} \frac{\rho_k \tau_k^{\text{ин}}}{\eta_1} \frac{R_2}{D} v, \quad (65)$$

При применении уравнения (65) часто оказывается удобным преобразовать слагаемое, выражающее вес бронирования, заменив в нем дробный множитель отношением относительной длины к длине судна. После такой замены уравнение (65) принимает вид

$$\eta = 1 - \rho_k - \rho_{\text{ос}} \frac{1}{P^{\frac{1}{3}}} - \frac{1}{146} \frac{\rho_k}{\eta_1} \frac{R}{D} v - \frac{k}{146} \frac{\rho_k \tau_k^{\text{ин}}}{\eta_1} \frac{R_2}{D} v, \quad (65')$$

или, если речь идет о проектировании гражданского судна,¹

$$\eta = 1 - \rho_k - \frac{1}{149 \eta_1} (\rho_k + k \rho_k \tau_k) \frac{R}{D} v.$$

Из последней формулы следует, что для однопалубных гражданских судов с относительно стабильными значениями коэффициентов ρ_k , $\rho_{\text{ос}}$ и ρ , коэффициент утилизации водозмещения при неизменной скорости и продолжительности плавания зависит в основном от отношения $R : D$, которое быстро возрастает с увеличением числа Фруда (Fr). При $Fr = \text{const}$ относительные веса механизмов и толщина возрастает пропорционально v , т. е. значительно медленнее, чем при увеличении Fr . Из сказанного следует, что быстроходные гражданские суда могут сохранять высокие значения η лишь в тех случаях, когда увеличение скорости сопровождается увеличением размеров судна. Иначе говоря, для сохранения одинакового коэффициента утилизации водозмещения малые суда должны про-

¹ Как и в предыдущем параграфе, для гражданских судов принимается

$\rho_{\text{ос}} = 0$, $\eta_1 = 0$ и $N_2 = N$.

тироваться с меньшими абсолютными скоростями хода, чем большие суда.

Этот вывод можно отнести и к военным кораблям, если понимать под η отношение веса вооружения и бронирования к водоизмещению.

Возвращаясь к уравнению (66), заметим, что оно может быть легко решено графическим путем. Для этого следует задаться рядом значений водоизмещения и вычислить для каждого из них величину η в левой части уравнения. Кроме того, для каждого водоизмещения, исходя из выбранной относительной длины, необходимо определить длину судна и соответствующие числа Рейнольдса и Фруда. После этого определяются частные значения $R:D$ и $I:L$ и (как и в предыдущих случаях) строится график исследуемой функции.

Так же решается и уравнение (68).

Вместо удельного сопротивления, относенного к одной тонне водоизмещения, нетрудно ввести в уравнение коэффициент утилизации водоизмещения любой другой параметр, характеризующий сопротивление, например безразмерный коэффициент сопротивления, отнесенный к смоченной поверхности.

§ 12. УПРОЩЕННОЕ УРАВНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УТИЛИЗАЦИИ ВОДОИЗМЕЩЕНИЯ. СПОСОБ ПРОЦЕНТИРОВАНИЯ ВОДОИЗМЕЩЕНИЯ

При определении водоизмещения грузовых судов по заданному дейдвуду можно воспользоваться для получения предварительных цифр упрощенным уравнением коэффициента утилизации водоизмещения по дейдвуду. Для этого, представив исходное уравнение в виде

$$(1 - \rho_s) D = P_m + P_{2m},$$

где P_{2m} — заданный дейдвуд, и разделив его почленно на P_{2m} , найдем

$$\frac{1 - \rho_s}{\eta_{2m}} = \frac{P_m}{P_{2m}} + 1,$$

откуда

$$\eta_{2m} = (1 - \rho_s) \frac{P_{2m}}{P_m + P_{2m}}.$$

Анализируя весовые соотношения танковых сухогрузных и нефтеналивных судов, можно убедиться, что отношение P_{2m} к сумме $P_m + P_{2m}$ не выходит обычно из пределов

$$\frac{P_{2m}}{P_m + P_{2m}} = 0,90 - 0,97.$$

В соответствии с этим в среднем

$$\eta_{2m} \approx 0,93 (1 - \rho_s). \quad (67)$$

Формулой (67) можно пользоваться лишь для самых грубых предварительных соображений. Поэтому перейдем к формуле (64), которая для коэффициента утилизации водоизмещения по дейдвуду дает

$$\eta_m = 1 - \rho_s - \frac{P_m}{C_1} \rho^{1,25} \frac{\eta_{2m}^{0,5}}{R^{0,25} D^{0,25}}.$$

Поскольку третий член в правой части последнего равенства выражается цифрой порядка 7% от η_{2m} , можно, не нарушая достигнутой в настоящем случае точности вычислений, заменить $\eta^{0,5}$ его значением по формуле (67). Тогда

$$\eta_m = (1 - \rho_s) - 0,96 (1 - \rho_s)^{0,5} \frac{P_m \rho^{1,25}}{C_1 R^{0,25} D^{0,25}}.$$

Подобным же образом из формулы (63) можно получить выражение

$$\eta_s = (1 - \rho_s) - 0,98 (1 - \rho_s)^{0,55} \frac{P_m}{C \rho^{0,55} D^{0,55}}.$$

Из формул (63) и (64) вытекают также следующие равенства, которые могут быть использованы для определения коэффициента утилизации по чистой грузоподъемности:

$$\eta = (1 - \rho_s) - 0,95 (1 - \rho_s)^{\frac{1}{2}} (\rho_s + k \rho_s \tau_s) \frac{v^{1,25}}{C_1 \rho^{0,5}}; \quad (68)$$

$$\eta = (1 - \rho_s) - 0,97 (1 - \rho_s)^{\frac{1}{2}} (\rho_s + k \rho_s \tau_s) \frac{v^2}{C \rho^{1,25}}. \quad (69)$$

Стабильность коэффициента утилизации водоизмещения по дейдвуду дает также основание определять в первом приближении водоизмещение грузовых судов по формуле

$$D = \frac{P_{2m}}{\eta_m},$$

устанавливая численное значение коэффициента η_m по прототипу. Этот прием очень удобен для предварительных подсчетов.

В технической литературе [3], [47], [58] можно найти различные способы процентирувания водоизмещения, который является попыткой применить отмеченный прием и при определении элементов военных кораблей. Способ процентирувания водоизмещения ос-

Пример определения водоизмещения и мощности механической грунтового судна

Показатели	При D			
	5500	6000	6500	7000
$\frac{1}{D^3}$	17,45	18,30	18,87	19,30
$L = L_0 D^3 = 5,75 D^3$	101,5	104,5	107,3	109,9
$\frac{1}{L^2}$	10,07	10,23	10,36	10,48
$Fr = \frac{u}{\sqrt{g L}} = \frac{2,29}{L^{0,5}}$	0,227	0,223	0,221	0,218
$\frac{R_f}{D}$	1,67	1,62	1,60	1,58
$\frac{R_m}{D}$	0,80	0,77	0,75	0,74
$\frac{R_{tot}}{D}$	0,91	0,85	0,80	0,75
$\frac{R}{D}$	3,38	3,32	3,15	3,02
$N = 0,16 \frac{R}{D} D$	2380	3100	3270	3370
$\eta_{tot} = \frac{P}{D} = \frac{4000}{D}$	0,728	0,667	0,615	0,572
$\eta_1 = 0,750 - \eta_{tot}$	-0,008	0,053	0,105	0,148
$x_1 = 0,605 \frac{R}{D}$	0,064	0,051	0,050	0,048

новым на допущении, что не только вес вооружения с боезапасом, но и другие веса изменяются пропорционально водоизмещению. Это дает основание принимать отдельные относительные веса $P_i : D$, входящие в нагрузку проектируемого корабля, равными относительным весам корабля-прототипа. Предварительно, однако, придется корректировать нагрузку корабля-прототипа с учетом новых заданий.

Так как все допущения, на которых основан рассматриваемый способ, далеки от действительности, то для получения хотя бы ориентировочных цифр приходится решать задачу в нескольких приближениях. Вследствие этого способ процентирующего водоизмещения не оправдывает себя.

§ 11. ЧИСЛЕННЫЙ ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УРАВНЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА УНИФИКАЦИИ ВОДОИЗМЕЩЕНИЯ

Ниже приведен пример определения водоизмещения и мощности механизма грунтового судна по заданному давлению и скорости хода, которые выражаются следующими цифрами:

$$P_{20} = 4000 \text{ м;}$$

$$u = 14 \text{ узлов; } \omega = 7,2 \text{ м/сек.}$$

Для этой цели использовано уравнение коэффициента унификации водоизмещения (66), которое в рассматриваемой задаче принимает вид

$$\eta_{20} = 1 - p_k - \frac{1}{146} p_m \frac{R}{D} \quad (70)$$

Предполагается, что числители весов в уравнении (70) сохраняют постоянное значение при всех вариациях водоизмещения, причем

$$p_k = 0,20;$$

$$p_m = 0,10.$$

Воздушное сопротивление введено в суммарный протопластинный коэффициент, который принят равным

$$\eta_1 = 0,5.$$

После подстановки заданных величин и принятых коэффициентов в уравнение (70) находим

$$\eta_{20} = 0,720 - 0,016 \frac{R}{D} \quad (71)$$

Кроме того, имеем

$$N = \frac{R}{D} \frac{D}{75} \frac{u}{75} = 0,16 \frac{R}{D} D.$$

Решая уравнение (71) графически, удобно определить искомый коэффициент унификации и соотносующие ему водоизмещение путем нахождения точки пересечения двух кривых

$$x_1 = 0,720 - \eta_{20};$$

$$x_2 = 0,016 \frac{R}{D}.$$

Результаты расчетов приведены в табл. 17, при составлении которой было принято

$$I_0 = \frac{L}{\rho \cdot 323} = 5,75;$$

$$\eta = \frac{b}{\rho} = 0,70.$$

Для построения табл. 17 следует отметить, что удельное остаточное сопротивление $\frac{R_{ост}}{D}$ определялось по графикам Тейлора. При подсчете сопротивления трения R_f коэффициент, учитывающий погрешку на шероховатость и выступившие части, был принят равным $\zeta = 0,8 \cdot 10^{-3}$.

Для получения более подробного решения можно было бы повторить расчеты, задаваясь другими значениями относительной длины и коэффициента продольной кривизны, однако решение задачи в нескольких вариантах целесообразно лишь в тех случаях, когда веса выражены более точными значениями.

Из табл. 17 можно заметить, что значения x_1 и x_2 приблизительно равны при водоизмещении судна, равном 6000 м. Более точное графическое построение дает

$$D = 5980 \text{ м};$$

$$N = 3100 \text{ д. с.};$$

$$\eta_{\text{дв}} = 0,67.$$

Найденному водоизмещению и мощности механизма соответствует следующая нагрузка судна в тоннах:

Вес корпуса	1070
« механизмов	338
Диаметр	4000

§ 12. ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ВЕСОВ

В тех случаях, когда уравнение весов является аналитическим, чаще всего приходится иметь дело с кубическим уравнением

$$x^3 + ax^2 + b = 0$$

или, если уравнение весов приведено к коэффициенту уткинщины водоизмещения, с кубическим уравнением

$$x^3 + a_1x + b_1 = 0.$$

После подстановки в первое уравнение

$$x = ay$$

и во второе уравнение

$$x = a_1^{1/3}y$$

оно приводится к более простому виду

$$y^3 + y^2 + \frac{b}{a^3} = 0.$$

$$y^3 + y + \frac{b_1}{a_1^{1,5}} = 0$$

и легко решается с помощью таблицы квадратов и кубов натуральных чисел. В общем случае уравнение

$$x^m + ax^n + b = 0$$

приводится к виду

$$y^m + y^n + \frac{b}{a^{m/n}} = 0,$$

где

$$k = \frac{1}{m-n}.$$

Для этого в исходное уравнение следует подставить

$$x = a^k y.$$

Ниже изложен прием аналитического решения алгебраических уравнений с целыми или дробными показателями степеней путем последовательных приближений, характеризующийся способом Ньютона применительно к виду функциональных зависимостей, которые входят в уравнения весов. Он может быть обоснован тем, что практически в уравнениях весов

$$\sum a_i x_i^{m_i} + P = 0$$

порядок величины x всегда известен заранее. В соответствии с этим можно задаться величиной x_0 , не очень отличающейся от искомого x , и переписать исходное уравнение следующим образом:

$$\sum \left[a_i x_0^{m_i} \left(\frac{x}{x_0} \right)^{m_i} \right] + P = 0.$$

Положим

$$\frac{x}{x_0} = 1 + k,$$

где k является малой дробью, найдем

$$\sum \left[a_i x_0^{m_i} (1 + k)^{m_i} \right] + P = 0. \quad (73)$$

При принятых предположениях о величине k

$$(1 + k)^{m_i} \approx 1 + m_i k,$$

в соответствии с чем уравнение (73) может быть приближенно записано уравнением

$$\sum \left[a_i x_0^{m_i} (1 + m_i k) \right] + P = 0. \quad (74)$$

Определив из уравнения (74) k , а затем

$$x = x_0(1 + k) = x_1,$$

можно рассматривать x_1 как решение исходного уравнения во втором приближении. Повторяя для него предыдущий выкладки, нетрудно найти новое значение $x = x_2$, которое обычно оказывается достаточно точным.

В качестве примера рассмотрим следующее уравнение весов, которое было получено для судна с ожидаемой длиной около 240—250 м:

$$\left(\frac{L}{100} \right)^3 = 1,23 \left(\frac{L}{100} \right)^2 + 3,18 \frac{L}{100} + 4,72.$$

Пример для первого приближения $L_0 = 240$ м и порезовым уравнением следующим образом:

$$13,8 \left(\frac{L}{240} \right)^3 = 7,07 \left(\frac{L}{240} \right)^2 + 2,95 \frac{L}{240} + 4,72.$$

Положим $\frac{L}{240} = 1 + k$,
найдем

$$13,8(1 + 3k) = 7,07(1 + 2k) + 2,95(1 + k) + 4,72.$$

Таким образом,

$$k = 0,035;$$

$$\frac{L}{240} = 1 + k = 1,035;$$

$$L = 249 \text{ м.}$$

Повторим те же выкладки, полагая $L_0 = 249$ м, и соответствия с тем уравнением весов примет вид

$$15,25 \left(\frac{L}{249} \right)^3 = 7,57 \left(\frac{L}{249} \right)^2 + 2,96 \frac{L}{249} + 4,72.$$

Пример аналогично предыдущему

$$\frac{L}{249} = 1 + k_1.$$

найдем

$$15,25(1 + 3k_1) = 7,57(1 + 2k_1) + 2,96(1 + k_1) + 4,72,$$

откуда

$$k_1 \approx 0.$$

Таким образом, можно принять в качестве окончательной цифры

$$L = 249 \text{ м.}$$

§ 13. ОБЩЕЕ ПОНЯТИЕ ОБ УРАВНЕНИИ ВЕСОВ В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ФОРМЕ

В § 5 было показано, что, используя уравнение весов в алгебраической форме, можно определить, как следует изменить элементы судна-прототипа для того, чтобы компенсировать заданные приращения независимых весов, скорости хода, района плавания и т. п. Обычно, однако, подобные задачи решаются методами дифференциального исчисления, причем элементы судна, изменяемые в уравнении весов, рассматриваются как независимые переменные. Предполагается, что речь идет о малых изменениях элементов судна и заданных величин, так как лишь в этом случае конечные их приращения могут быть заменены дифференциалами.

Для того чтобы ввести ясность в вопрос о погрешности, обусловленной принятыми допущениями, сопоставим дифференциальный метод решения задачи с более точным приемом.

Допустим, что какой-либо из весов, входящих в нагрузку, выражается зависимостью

$$P = pL^a,$$

причем для судна-прототипа $P = P_0$ и $L = L_0$.

Дифференциальным методом после замены P и L их частными значениями, указанными выше, найдем

$$dP = apL^{a-1} dL = a \frac{P_0}{L_0} dL.$$

Искомое приращение dP можно найти также, разложив выражение

$$P = p(L + dL)^a$$

в ряд Маклорена. Сохранив лишь первые три члена разложения, найдем после соответствующих подстановок:

$$P = P_0 + nP_0 \frac{dL}{L_0} + \frac{n(n-1)}{2} P_0 \left(\frac{dL}{L_0} \right)^2.$$

и, таким образом,

$$dP = nP_0 \frac{dL}{L_0} + \frac{n(n-1)}{2} P_0 \left(\frac{dL}{L_0} \right)^2.$$

Это более точное решение отличается от менее точного на величину

$$\Delta = \frac{n(n-1)}{2} P_0 \left(\frac{dL}{L_0} \right)^2.$$

Таблица 18

Относительные погрешности вычислений дифференциальным методом

Отношение

$$\frac{\Delta}{P_0} = \frac{1}{2} n(n-1) \left(\frac{dL}{L_0} \right)^2 \quad (74)$$

характеризует приблизительно относительную погрешность дифференциального метода в тех случаях, когда мы имеем дело с функциональными зависимостями, которые содержат одну порезовую величину.

В табл. 18 приведены относительные погрешности вычислений, подсчитанные по формуле (74) для трех различных приращений при нескольких значениях показателя степени n .

Как это следует из формулы (74) и табл. 18, относительная погрешность вычислений, присущая рассматриваемому способу решения задачи, зависит от относительного приращения $\frac{dL}{L}$ отдельных элементов судна и от показателей степени, с которыми они

n	$\frac{dL}{L}$		
	0,05	0,10	0,20
2,0	0,75	3,0	—
2,5	0,25	1,0	—
3,0	0	0	0
0,07	0,08	0,11	0,46
0,5	0,03	0,12	0,60

входят в исходные функциональные зависимости. Погрешность вычислений возрастает в тех случаях, когда дифференцируются в частных производных функциональные зависимости, содержащие несколько переменных величин, например $x, y, z, \dots$. Действительно, если отбросить малые величины порядка выше второго, приращение такой функции выражается формулой

$$df(x, y, z, \dots) = \left(\frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy + \frac{\partial f}{\partial z} dz + \dots \right) + \\ + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} dx^2 + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} dy^2 + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} dz^2 + \dots \right) + \\ + \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} dx dy + \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial z} dx dz + \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial z} dy dz + \dots \right).$$

Отбросив члены, содержащие малые величины второго порядка, в соответствии с чем

$$df(x, y, z, \dots) = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy + \frac{\partial f}{\partial z} dz + \dots$$

мы вводим в расчеты погрешность

$$\Delta = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} dx^2 + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} dy^2 + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} dz^2 + \dots \right) + \\ + \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} dx dy + \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial z} dx dz + \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial z} dy dz + \dots \right).$$

В последней формуле каждый из членов, содержащих квадраты приращений $dx, dy, dz, \dots$, соответствует введенной ранее погрешности функции от одной переменной. Остальные члены выражают дополнительную погрешность, свойственную функции от нескольких переменных.

На основе опыта использования дифференциальных приемов установилось мнение, что погрешность вычислений не выходит из допустимых пределов, если вариации элементов не превосходят (в процентах):

По скорости хода	4-5
• главным размерениям	7-10
• водоизмещению	20

В некоторых случаях при использовании дифференциальных приемов может возникнуть необходимость уточнить решение по второму приближению.

§ 14. ОБОБЩЕННОЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ ВЕСОВ

Рассмотренная ранее задача дана в настоящем параграфе в наиболее общей постановке, что позволяет назвать полученное дифференциальное уравнение обобщенным. Приведенные в дальнейшем

изложения решения И. Г. Бубнова и Нормана могут рассматриваться как частные случаи обобщенного дифференциального уравнения весов.

Представим уравнение весов в следующей форме:

$$P = D - F(\lambda, L, B, T, H, a, b, c, \dots),$$

где P — сумма независимых весов, а D, λ, L, B, T, H — водоизмещение, коэффициент общей полноты и главные размерения судна. Под a, b, c будем понимать прочие величины, которые входят в функциональные зависимости, выражающие отдельные веса, например измерители весов, практические коэффициенты и заданные величины в виде скорости хода, дальности плавания и т. п.

Полный дифференциал функции P выражается равенством

$$dP = dD - dF, \quad (75)$$

из которого следует, что приращению dD соответствует меньшее приращение dF . Для объяснения этого обстоятельства допустим, что увеличение водоизмещения должно компенсировать заданное приращение постоянных весов, а скорость хода и дальность плавания судна остаются неизменными.

С увеличением водоизмещения возрастает сопротивление воды, а следовательно, и мощность машинной установки. Это приводит к увеличению веса механизма и топлива. Кроме того, увеличение водоизмещения приводит к возрастанию веса корпуса, как вследствие увеличения главных размерений, так и вследствие изменения удельной прочности. Таким образом, лишь часть приращения dD может быть использована для увеличения веса P .

При дифференцировании в частных производных водоизмещения и функции весов в качестве независимых переменных рассматриваются как элементы судна, так и параметры, обозначенные буквами $a, b, c, \dots$. В соответствии с формулой (46)

$$dD = \frac{\partial D}{\partial \lambda} d\lambda + \frac{\partial D}{\partial L} dL + \frac{\partial D}{\partial B} dB + \frac{\partial D}{\partial T} dT.$$

Аналогично можно написать

$$dF = \frac{\partial F}{\partial \lambda} d\lambda + \frac{\partial F}{\partial L} dL + \frac{\partial F}{\partial B} dB + \frac{\partial F}{\partial T} dT + \\ + \frac{\partial F}{\partial a} da + \frac{\partial F}{\partial b} db + \dots + \left| \frac{\partial F}{\partial H} dH \right|.$$

Последний член вынесен за вертикальную черту, так как дифференциал dH может рассматриваться либо как произвольное приращение высоты борта, либо как искомое приращение одного из элементов судна. В последнем случае этот член должен быть введен в дифференциал dD .

Подставив значения dD и dF в уравнение (75), приходим к следующему дифференциальному уравнению весов:

$$dP = \left(\frac{D}{L} - \frac{\partial F}{\partial L} \right) dL + \left(\frac{D}{B} - \frac{\partial F}{\partial B} \right) dB + \left(\frac{D}{T} - \frac{\partial F}{\partial T} \right) dT - \frac{\partial F}{\partial a} da - \frac{\partial F}{\partial b} db - \dots - \left| \frac{\partial F}{\partial H} \right| dH.$$

Введем обозначение

$$|dF|_b = \frac{\partial F}{\partial a} da + \frac{\partial F}{\partial b} db + \frac{\partial F}{\partial c} dc + \dots + \left| \frac{\partial F}{\partial H} \right| dH,$$

понимая под этим символом полный дифференциал функции F по всем независимым переменным, за исключением главных размеров корабля и его коэффициента общей полноты. Иначе говоря, $|dF|_b$ представляет собой сумму приращений всех весов, вызванных произвольным изменением высоты борта и параметров $a, b, c, \dots$, без учета дополнительного приращения весов, связанных с изменением элементов судна.

Выделение дифференциала $|dF|_b$ оказалось возможным (см. § 13) потому, что мы отбросили члены, содержащие малые величины порядка члена первого, и в том числе произведения приращений $da dL, da dB, \dots, db dL, db dB, \dots$.

Используя принятое обозначение, переищем предыдущее уравнение в окончательном виде

$$dP + |dF|_b = \left(\frac{D}{L} - \frac{\partial F}{\partial L} \right) dL + \left(\frac{D}{B} - \frac{\partial F}{\partial B} \right) dB + \left(\frac{D}{T} - \frac{\partial F}{\partial T} \right) dT. \quad (76)$$

Величины, стоящие в левой части уравнения (76), могут рассматриваться как заданные, причем дифференциал $|dF|_b$ должен быть заранее определен дифференцированием функции весов F по переменным $a, b, c, \dots$. Так же определяются и частные производные функции весов по главным размерениям и коэффициенту общей полноты. Отношения подомещения к главным размерениям и коэффициенту δ вычисляются по данным судна-прототипа.

Искомые величины в уравнении (76) являются приращения элементов судна. Если дифференциал dH рассматривается как искомая величина, и в правой части уравнения появляется дополнительный член $-\frac{\partial F}{\partial H} dH$.

Для того чтобы пояснить, каким образом вычисляются частные производные функции весов и полный дифференциал $|dF|_b$, допу-

стим, что какой-либо из весов, входящих в функцию F , выражается зависимостью

$$P_i = p_i \delta^m L^a B^b,$$

в которой показатели степени могут быть целыми или дробными, положительными или отрицательными числами.

Пусть требуется вычислить величину частной производной функции F по δ . Беря частную производную от P_i , найдем

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta} = m p_i \delta^{m-1} L^a B^b = m \frac{P_i}{\delta}.$$

Таким образом, для функциональных зависимостей рассматриваемого вида частная производная от какого-либо веса равна этому весу, деленному на элемент, по которому производится дифференцирование, и умноженному на показатель степени при этом элементе.

Величина этой частной производной вычисляется исходя из нагрузок прототипа. Частная производная функции F по δ

$$\frac{\partial F}{\partial \delta} = \sum \frac{\partial P_i}{\partial \delta}$$

определяется суммированием частных производных отдельных весов.

Остается пояснить, как вычисляются частные производные веса механизмов и веса топлива, когда мощность механизмов определяется при помощи графиков или таблиц. В подобных случаях следует определить мощности механизмов, соответствующие несколько увеличенным и несколько уменьшенным элементам судна. Пусть, например, для судна $(L + \Delta L)$ и $(L - \Delta L)$ соответствуют мощности механизмов N_1 и N_2 , веса которых равны P_1 и P_2 . Частная производная веса механизмов по длине может быть, очевидно, получена из зависимости

$$\frac{\partial P_m}{\partial L} = \frac{1}{2} \frac{P_1 - P_2}{\Delta L}.$$

Таким же способом могут быть вычислены и остальные частные производные этого веса по главным размерениям и коэффициенту δ , а также по скорости хода (для определения $|dF|_b$). Во многих случаях удобно дифференцировать известную P_m известными графическими приемами и строить соответствующую дифференциальную кривую.

Из изложенного следует, что в уравнении (76) все величины за исключением da, dL, db, dT являются либо заданными величинами, либо величинами, которые могут быть вычислены по длинам, относящимся к прототипу. Для того чтобы решить уравнение (76), необходимо задаться дополнительными зависимостями в виде, например, уравнения устойчивости в дифференциальной форме или в виде фиксированных соотношений элементов, а также оповорить

принятое изменение высоты борта. Во втором случае дополнительные условия могут быть выражены следующим образом:

$$\frac{L + dL}{B + dB} = m;$$

$$\frac{B + dB}{T + dT} = n;$$

$$L + dB = L_0$$

где m , n , L_0 — заданные величины.

Уже отмечалось, что иногда удобнее рассматривать приращение dH не как заданную, а как искомую величину. При такой постановке задачи для решения уравнения (76) нужно ввести еще одно дополнительное условие, например

$$\frac{B + dB}{T + dT} = k.$$

После определения элементов судна новая нагрузка составляется либо путем алгебраических пересчетов либо путем определения приращений отдельных весов по формуле

$$dP_i = \frac{\partial P_i}{\partial L} dL + \frac{\partial P_i}{\partial B} dB + \frac{\partial P_i}{\partial T} dT + [dP]_k,$$

где, как и в предыдущих случаях, принято обозначение

$$[dP]_k = \frac{\partial P_i}{\partial a} da + \frac{\partial P_i}{\partial b} db + \dots + \left| \frac{\partial P_i}{\partial H} dH \right|.$$

Дифференциал $[dP]_k$, вошедший в эту формулу, вычисляется при определении дифференциала $[dF]_k$. Частные производные отдельных весов по главным размерениям и коэффициенту общей полноты вычисляются при определении аналогичных частных производных функций весов F . Таким образом, после определения приращений dL , dB , dT все необходимые данные для вычисления отдельных весов оказываются известны.

В заключение следует отметить, что в обобщенное дифференциальное уравнение весов можно было бы ввести дополнительные и любые другие элементы судна, например коэффициенты полноты грузовой интерлинии и мидель-шпангоута, если бы представлялось необходимо учесть их влияние на весовые соотношения. Однако из практических соображений принято выражать эти коэффициенты в уравнении весов через коэффициент общей полноты, пользуясь известными приближенными соотношениями.

При использовании обобщенного дифференциального уравнения весов необходимо учесть соображения, изложенные в заключительной части 13.

5. 13. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ ВЕСОВ БУБНОВА

В 1911 г. на лекциях по проектированию кораблей в Морской академии И. Г. Бубнов развил принцип нового метода определения элементов проектируемого судна путем совместного решения дифференциальных уравнений весов и остойчивости. В общей форме И. Г. Бубнов изложил предложенный им метод в докладе [9], прочитанном в 1916 г. в Союзе морских инженеров. В более конкретизированном виде этот метод был изложен А. И. Балкашиным в литографированном курсе лекций в 1914 г., а затем в ряде подневных работ, в частности в курсе [3].

Наше метод И. Г. Бубнова рассматривается только в той части, которая имеет отношение к использованию дифференциального уравнения весов, причем изложение этого вопроса отличается от изложения И. Г. Бубнова и А. И. Балкашина.

В исходное уравнение весов И. Г. Бубнов ввел лишь длину, ширину и осадку судна, исчисленные чего оно может быть представлено в виде

$$P = D - F(L, B, T).$$

Дифференцируя это уравнение в частных производных, подобно тому, как это было сделано при рассмотрении обобщенного уравнения весов, нетрудно вывести следующее уравнение:

$$dP = \left(\frac{\partial}{\partial L} - \frac{\partial F}{\partial L} \right) dL + \left(\frac{\partial}{\partial B} - \frac{\partial F}{\partial B} \right) dB + \left(\frac{\partial}{\partial T} - \frac{\partial F}{\partial T} \right) dT. \quad (77)$$

Это уравнение может рассматриваться как частный случай обобщенного уравнения (76), в которое введены дополнительные условия

$$[dF]_k = 0;$$

$$dH = dH = 0.$$

Таким образом, уравнение (77) отличается от уравнения (76) прежде всего тем, что в первое уравнение не введены коэффициент общей полноты и высота борта. Это отличие не имеет принципиального значения, и в уже названном выше докладе И. Г. Бубнов отмечает возможность введения в его дифференциальное уравнение дополнительных параметров.

Второе отличие сопоставляемых решений сводится к тому, что в уравнении И. Г. Бубнова отсутствуют дифференциалы и частные производные по произвольным параметрам и тактико-техническим элементам, которые в уравнении (76) вошли в член $[dF]_k$. Для того чтобы обойти связанные с этим затруднения, И. Г. Бубнов предлагал исходить в пересчетах по прототипу не из фактической, а из переработанной (исправленной) нагрузки прототипа.¹

¹ Вопрос об исправленной нагрузке изложен ниже несколько иначе, чем в оригинальном труде И. Г. Бубнова.

Переработанная нагрузка прототипа составляется таким образом, чтобы все требования заданий, касающиеся изменений скорости хода, района плавания, толщины бронирования, могли быть реализованы без изменения размеров судна-прототипа. Таким же образом следует ввести в нагрузку прототипа и изменения, вытекающие из новых конструктивных решений, в частности, из изменения H при переходе на новую высоту надводного борта, поскольку высота борта не вошла в уравнение И. Г. Бубнова.

После введения всех необходимых изменений весовая нагрузка не будет соответствовать водоизмещению прототипа. Это расхождение может быть компенсировано за счет изменения заданных весов (вес вооружения, грузоподъемности).

Сущность изложенного способа исправления нагрузки корабля-прототипа может быть пояснена табл. 19, составленной в предположении, что по сравнению с прототипом скорость корабля должна быть увеличена на 5%, дальность плавания в милях — на 10% и в нагрузку следует ввести двухпроцентный запас водоизмещения. Кроме того, предполагается, что в результате детального пересчета весов бронирования выявилась необходимость снизить приведенную толщину брони на 8%.

Исходя из наиболее простых допущений о влиянии изменения скорости, при исправлении нагрузки были приняты следующие переходные множители:

$$\frac{P_a}{(P_{ab})} = \left(\frac{v}{v_0}\right)^3 = 1,16;$$

$$\frac{P_m}{(P_{mh})} = \left(\frac{v}{v_0}\right)^3 \left(\frac{r}{r_0}\right) = 1,21;$$

$$\frac{P_g}{(P_{gh})} = \sum \frac{G_i}{(G_i)_0} = 0,925.$$

Пересчет нагрузки может быть проведен и дифференцированием отдельных весов. Этот путь приводит к следующим результатам:

$$dP_a = 3(P_{ab}) \frac{dv}{v} = 0,15(P_{ab})_0;$$

$$dP_m = (P_{mh}) \left(2 \frac{dv}{v} + \frac{dr}{r} \right) = 0,20(P_{mh})_0;$$

$$dP_g = - (P_{gh})_0 \frac{d\delta}{\delta} = -0,08(P_{gh})_0.$$

Таким образом,

$$P_a = 1,15(P_{ab})_0;$$

$$P_m = 1,20(P_{mh})_0;$$

$$P_g = 0,92(P_{gh})_0.$$

что лишь незначительно отличается от полученных ранее результатов.

Таблица 19

Составление исправленной нагрузки корабля-прототипа

Разделы нагрузки	Нагрузка прототипа, т	Переходные множители	Исправленные веса прототипа, т
Корпус	15 000	1,00	15 000
Бронирование	14 000	0,925	12 950
Снабжение	800	1,00	800
Механизмы	5000	1,16	5800
Топливо	1200	1,21	1450
Запас водоизмещения	—	—	900
Подъемные силы	45 000	—	45 000
Вооружение и боезапас	9000	—	8000

Как это следует из табл. 19, в рассмотренном случае после исправления нагрузки вес вооружения уменьшился с 9000 до 8000 т.

Необходимо отметить, что табл. 19, имея для часто встречающегося значения, составленной веса элементарно. Для получения достоверных результатов такие таблицы должны составляться путем детальных расчетов по проекциям и рабочим чертежам с использованием кривых сопротивления воды корабля-прототипа. В частности, необходимо детально рассмотреть статьи нагрузки, относящиеся к весу корпуса, с тем, чтобы надлежащим образом отразить изменения конструктивных изменений в новом проекте, например изменение числа водонепроницаемых переборок, изменение длины надстроек и т. п. То же относится и к весу бронирования, который также должен быть рассмотрен на составные части.

Все прочие пояснения, необходимые для использования уравнения И. Г. Бубнова, были изложены в предыдущем параграфе применительно к обобщенному уравнению веса, и здесь остается лишь отметить, что способ исправления нагрузки судна-прототипа, предложенный И. Г. Бубновым, связан с некоторыми затруднениями. Это относится в основном к исправлению весов, вызванным изменением высоты надводного борта, поскольку надводный борт же может быть обобщенно зафиксирован без учета осадки судна. Поэтому рациональнее рассматривать высоту борта как исходную величину наряду с осадкой.

Влияние изменения толщины бронирования может быть с оди-

накомым успехом учтено путем исправления нагрузки или путем введения дифференциала веса бронирования в функцию $[dF]_h$. Намеченные изменения в корпусных конструкциях удобнее всего учитывать способом, предложенным И. Г. Вульфовым.

§ 16. ОБОБЩЕННЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ПРИРАЩЕНИЯ ВОДОЗМЕЩЕНИЯ

КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИРАЩЕНИЯ ВОДОЗМЕЩЕНИЯ ПО ГЛАВНЫМ РАЗМЕРЕНИЯМ И КОЭФФИЦИЕНТУ ОБЩЕЙ ПОЛНОТЫ

Введем обозначения:

$$\Delta = dP + [dF]_h;$$

$$[dF]_h = \frac{\partial F}{\partial x} dx + \frac{\partial F}{\partial L} dL + \frac{\partial F}{\partial B} dB + \frac{\partial F}{\partial T} dT.$$

Тогда обобщенное дифференциальное уравнение может быть представлено в виде

$$\Delta = dD - [dF]_h = dD \left(1 - \frac{[dF]_h}{dD} \right). \quad (78)$$

Решая уравнение (78) относительно dD , найдем

$$dD = \Delta \eta_{\text{об}}. \quad (79)$$

Множитель $\eta_{\text{об}}$, который мы будем в дальнейшем называть обобщенным коэффициентом приращения водозмещения, выражается формулой

$$\eta_{\text{об}} = \frac{1}{1 - \frac{[dF]_h}{dD}}. \quad (80)$$

или

$$\frac{[dF]_h}{dD} = \frac{\frac{\partial F}{\partial x} x + \frac{\partial F}{\partial L} L + \frac{\partial F}{\partial B} B + \frac{\partial F}{\partial T} T}{\frac{D}{1} B + \frac{D}{L} L + \frac{D}{B} B + \frac{D}{T} T}. \quad (81)$$

Зная численное значение коэффициента $\eta_{\text{об}}$, соответствующее рассматриваемому судну, можно определить по формуле (79) приращение водозмещения, способное компенсировать заданное приращение веса Δ . Для этого необходимо, однако, предварительно исключить из формулы (81) неизвестные приращения элементов.

В соответствии с изложенным для вычисления обобщенного коэффициента приращения водозмещения применительно к конкретной задаче необходимо задаться соотношениями между относительными и абсолютными приращениями отдельных элементов судна. Остановимся на наиболее важных частных случаях решения этой задачи.

Рассмотрим прежде всего поставленную задачу в предположении, что заданное приращение веса Δ компенсируется за счет одного какого-либо элемента судна.

Пусть, например:

$$dL = dB = dT = 0; \quad d\delta \neq 0.$$

Тогда формула (81) дает

$$\frac{[dF]_h}{dD} = \frac{\partial F}{\partial \delta} \frac{1}{D}.$$

Составив аналогичные выражения применительно к другим элементам судна, мы приходим на основании формулы (80) к следующим равенствам:

$$\left. \begin{aligned} \eta_L &= \frac{1}{1 - \frac{\partial F}{\partial L} \frac{L}{D}}; \\ \eta_B &= \frac{1}{1 - \frac{\partial F}{\partial B} \frac{B}{D}}; \\ \eta_T &= \frac{1}{1 - \frac{\partial F}{\partial T} \frac{T}{D}}. \end{aligned} \right\} \quad (82)$$

Коэффициенты η_L , η_B , η_T могут быть названы коэффициентами приращения водозмещения по коэффициенту общей полноты, длине, ширине и осадке судна. Как это следует из предыдущего изложения, они позволяют определить, насколько изменится водозмещение судна-прототипа вследствие изменения независимых весов, тактико-технических показателей и различного рода практических коэффициентов, если предположить, что изменение веса будет компенсировано за счет лишь одного какого-либо элемента.

Для этого можно воспользоваться одной из формул

$$\left. \begin{aligned} (dD)_L &= \Delta_L \eta_L; \\ (dD)_B &= \Delta_B \eta_B; \\ (dD)_T &= \Delta_T \eta_T, \end{aligned} \right\} \quad (83)$$

которые получаются из равенства (79), если отметить в последнем приращении dD и Δ , а также коэффициент приращения водозмещения соответствующими индексами.

Коэффициенты приращенки водоизмещения по главным размерениям к коэффициенту общей полноты могут быть вычислены для каждого конкретного судна, если известны его элементы и нагрузка.

В тех случаях, когда технические задания приводят к необходимости увеличить водоизмещение судна-прототипа, то с весовой точки зрения это выгоднее всего осуществлять за счет того элемента, которому соответствует минимальное значение коэффициента приращения водоизмещения. Вообще теоретически выгодно увеличивать те элементы судна, которые соответствуют меньшим значениям коэффициентов приращения водоизмещения, за счет уменьшения элементов, соответствующих большим коэффициентам приращения водоизмещения. Можно показать, что судно минимального водоизмещения характеризуется равенством

$$\eta_b = \eta_L = \eta_B = \eta_T. \quad (84)$$

однако в действительности нельзя спроектировать судно так, чтобы оно полностью удовлетворяло этому требованию, поскольку при выборе его элементов приходится учитывать и ряд других условий, связанных с остойчивостью, качкой, ходкостью, жесткостью и другими свойствами судна. Поэтому практически следует говорить не о минимальном, а о минимально возможном водоизмещении.

Составим теперь, воспользовавшись формулой (82), другое, более удобное выражение обобщенного коэффициента приращения водоизмещения. Для этого представим первую из отмеченных формул в виде равенства

$$\frac{\partial F}{\partial b} \delta b = \left(1 - \frac{1}{\eta_b}\right) \frac{D}{b} \delta b.$$

После аналогичного преобразования остальных формул, входящих в систему (82), формула (81) может быть представлена следующим образом:

$$\frac{\partial F}{\partial D} = \frac{\left(1 - \frac{1}{\eta_b}\right) \frac{D}{b} + \left(1 - \frac{1}{\eta_L}\right) \frac{D}{L} + \left(1 - \frac{1}{\eta_B}\right) \frac{D}{B} + \left(1 - \frac{1}{\eta_T}\right) \frac{D}{T}}{\frac{D}{b} + \frac{D}{L} + \frac{D}{B} + \frac{D}{T}} \quad (85)$$

или в другом виде

$$1 - \frac{\partial F}{\partial D} = \frac{\frac{1}{\eta_b} \frac{D}{b} + \frac{1}{\eta_L} \frac{D}{L} + \frac{1}{\eta_B} \frac{D}{B} + \frac{1}{\eta_T} \frac{D}{T}}{\frac{D}{b} + \frac{D}{L} + \frac{D}{B} + \frac{D}{T}}. \quad (86)$$

Из формул (80) и (86) следует, что

$$\eta_{ob} = \frac{\frac{D}{b} + \frac{D}{L} + \frac{D}{B} + \frac{D}{T}}{\frac{1}{\eta_b} \frac{D}{b} + \frac{1}{\eta_L} \frac{D}{L} + \frac{1}{\eta_B} \frac{D}{B} + \frac{1}{\eta_T} \frac{D}{T}}. \quad (87)$$

Формула (87) выражает обобщенный коэффициент приращения водоизмещения через коэффициенты $\eta_b, \eta_L, \eta_B, \eta_T$. Пользуясь этой формулой, легко определить коэффициент η_{ob} для любых частных случаев.

Пусть, например, при переходе от судна-прототипа к проектируемому судну требуется пропорционально изменить главные размеры прототипа. Это условие может быть записано следующим образом:

$$\begin{aligned} \delta b &= 0; \\ \frac{\delta L}{L} &= \frac{\delta B}{B} = \frac{\delta T}{T} = a. \end{aligned} \quad (88)$$

Учитывая последнее равенство, можно представить в рассматриваемом случае формулу (87) в виде

$$\eta_{ob} = \frac{1}{\frac{1}{\eta_b} + \frac{1}{\eta_B} + \frac{1}{\eta_T}}. \quad (89)$$

Допустим теперь, что при переходе от судна-прототипа к проектируемому судну принято решение изменить в одинаковой пропорции не только главные размеры прототипа, но и коэффициент общей полноты. В этом случае по аналогии с формулой (89) можно написать

$$\eta_{ob} = \frac{1}{\frac{1}{\eta_b} + \frac{1}{\eta_L} + \frac{1}{\eta_B} + \frac{1}{\eta_T}}. \quad (90)$$

В отличие от равенств (89) и (87), выражающих коэффициент η_{ob} в общем виде, формулы (89) и (90) позволяют вычислять этот коэффициент для каждого конкретного судна, если известны его элементы и нагрузка.

§ 17. УРАВНЕНИЕ И КОЭФФИЦИЕНТ НОРМАЛА

Рассмотрим задачу о приращении водоизмещения судна-прототипа, вызванном изменением заданных тактико-технических показателей и различного рода практических коэффициентов в том частном случае, когда все выражены в функции водоизмещения. Исходное уравнение весов в этом случае может быть записано следующим образом:

$$P = D - F(D, a, b, c, \dots), \quad (91)$$

в котором, как и прежде, буквами a, b, c обозначены тактико-технические показатели, произвольные параметры, измерители и т. п.

Вывод искомого дифференциального уравнения в календарных Нормалах относительно сложен. Следуя общему методу, который

был использован в предыдущих параграфах, нетрудно получить те же результаты, дифференцируя уравнение (91) в частных производных. В этом случае, сохранив прежние ранее обозначения, можно написать

$$dP = dD - \frac{\partial F}{\partial D} dD - [dF]_0,$$

где

$$[dF]_0 = \frac{\partial F}{\partial a} da + \frac{\partial F}{\partial b} db + \dots$$

Таким образом, искомое приращение водоизмещения равно

$$dD = \frac{dP + [dF]_0}{1 - \frac{\partial F}{\partial D}} = \frac{\Delta}{1 - \frac{\partial F}{\partial D}}$$

или в другом виде

$$dD = \Delta \gamma_{\Delta}, \quad (92)$$

где

$$\gamma_{\Delta} = \frac{1}{1 - \frac{\partial F}{\partial D}}. \quad (93)$$

Коэффициент γ_{Δ} , который называется коэффициентом Нормана, может рассматриваться как частный коэффициент приращения водоизмещения, соответствующий определенному виду алгебраического уравнения весов.

Формула (93) вытекает непосредственно из формулы (80). Действительно, если все веса судна выражены через водоизмещение,

$$\frac{[dF]_0}{dD} = -\frac{\frac{\partial F}{\partial D} dD}{dD} = -\frac{\partial F}{\partial D}$$

и, следовательно,

$$\gamma_{\Delta} = \frac{1}{1 - \frac{[dF]_0}{dD}} = \frac{1}{1 - \frac{\partial F}{\partial D}} = \gamma_{\Delta}.$$

В тех случаях, когда веса выражены в функции водоизмещения, с формальной точки зрения безразлично, за счет какого из элементов судна производится увеличение водоизмещения. В соответствии с этим в рассматриваемом случае коэффициенты приращения водоизмещения по главным размерам и коэффициенту общей полноты равны друг другу и коэффициенту γ_{Δ} .

Действительно, при принятых предположениях

$$F = \sum P_i = \sum p_i D^{\alpha_i} = \sum p_i (\gamma_i M B T)^{\alpha_i};$$

$$\frac{\partial F}{\partial \Delta} = \sum \alpha_i \frac{P_i}{\Delta};$$

$$\gamma_{\Delta} = \frac{1}{1 - \sum \alpha_i \frac{P_i}{\Delta} \frac{\Delta}{D}} = \frac{1}{1 - \sum \alpha_i \frac{P_i}{D}} = \gamma_{\Delta}.$$

Распространяя полученный вывод на другие коэффициенты приращения водоизмещения по главным размерам, найдем

$$\gamma_{\Delta} = \gamma_L = \gamma_B = \gamma_T = \gamma_{\Delta} = \gamma_{\Delta},$$

что и требовалось доказать.

В заключение рассмотрим пример, приведен за основу уравнение весов

$$D = p_{\Delta} D + p_{\sigma} D^{\frac{2}{3}} + p_{\kappa} \frac{D^{\frac{2}{3}} \sigma}{C} + p_{\sigma} \frac{D^{\frac{2}{3}} \kappa^2}{C_{\kappa}} + p_r,$$

где

$$r = r_{\Delta}.$$

Применяя формулу (93), приходим к выражению

$$\gamma_{\Delta} = \frac{1}{1 - \frac{p_{\Delta}}{D} - \frac{2}{3} \left(\frac{p_{\sigma}}{D} + \frac{p_{\kappa}}{D} + \frac{p_r}{D} \right)}. \quad (94)$$

Отдельные слагаемые, входящие в дифференциал

$$[dF]_0 = [dP_{\Delta}]_0 + [dP_{\sigma}]_0 + [dP_{\kappa}]_0 + [dP_r]_0$$

найдутся следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} [dP_{\Delta}]_0 &= P_{\Delta} \frac{dP_{\Delta}}{P_{\Delta}}; \\ [dP_{\sigma}]_0 &= P_{\sigma} \left(\frac{dP_{\sigma}}{P_{\sigma}} + \frac{d\sigma}{\sigma} \right); \\ [dP_{\kappa}]_0 &= P_{\kappa} \left(\frac{dP_{\kappa}}{P_{\kappa}} + 3 \frac{d\sigma}{\sigma} + \frac{dC}{C} \right); \\ [dP_r]_0 &= P_r \left(\frac{dP_r}{P_r} + \frac{dr}{r} + 2 \frac{d\kappa}{\kappa} - \frac{dC_{\kappa}}{C_{\kappa}} \right). \end{aligned} \right\} \quad (95)$$

Приращение водоизмещения равно:

$$dD = (dP + [dF]_0) \gamma_{\Delta}.$$

Постоянные же именные переменных весов выражаются следующим образом:

$$dP_{\Sigma} = [dP_{\Sigma}]_0 + \frac{P_{\Sigma}}{D} dD; \quad (96)$$

$$dP_{\partial} = [dP_{\partial}]_0 + \frac{2}{3} \frac{P_{\partial}}{D} dD; \quad (97)$$

$$dP_{\Sigma} = [dP_{\Sigma}]_0 + \frac{2}{3} \frac{P_{\Sigma}}{D} dD; \quad (98)$$

$$dP_r = [dP_r]_0 + \frac{2}{3} \frac{P_r}{D} dD. \quad (99)$$

Коэффициент Нормана одностопных судов изменяется в относительно узких пределах, обусловленных соотношениями отдельных частей нагрузки. Если коэффициент η_n вычисляется по формуле (94), он обычно не выходит из следующих пределов:

Грузовые суда	1,5—1,7
Пассажирские суда	1,8—2,2
Линейные корабли	2,2—3,0
Крейсеры	3,0—3,5
Миниатюрные	3,5—4,0

Стабильность коэффициента η_n позволяет использовать его для ориентировочных расчетов водонесения, в которых численное значение этого коэффициента выбирается на основе практических данных по одностопным судам.

§ 18. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ ВЕСОВ ВТОРОГО ПОРЯДКА

Как отмечалось, с увеличением степеней независимых переменных точность рассмотренных дифференциальных уравнений снижается и может оказаться нецелесообразной для решения поставленной задачи. В подобных случаях, после составления ишей нагрузки и потерь, численное значение $\Delta P = P - P_r$ рекомендуется определять эмпирически для заданного приближения. При этом ΔP рассматривается как заданное приращение веса.

Иногда достаточно точное решение может быть получено сразу путем применения дифференциального уравнения весом второго порядка. Однако подобный прием наложен применительно к практическим расчетам водонесения, когда приходится дифференцировать исходное уравнение по водонесению и скорости хода. Для простоты алгебраическое уравнение весов принято в форме

$$P_{\Sigma} = (1 - \rho_n) D - \rho_n \frac{D^{\frac{2}{3}} v^{\frac{2}{3}}}{C}.$$

Исходное дифференциальное уравнение может быть получено (см. § 13) из равенства

$$dP_{\Sigma} = \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial D} dD + \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial v} dv + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 P_{\Sigma}}{\partial D^2} dD^2 + \frac{\partial^2 P_{\Sigma}}{\partial D \partial v} dD dv + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 P_{\Sigma}}{\partial v^2} dv^2. \quad (100)$$

Частные производные в формуле (100) выражаются следующим образом:

$$\frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial D} = (1 - \rho_n) - \frac{2}{3} \frac{P_{\Sigma}}{D} = \left(1 - \frac{P_{\Sigma}}{D}\right) - \frac{2}{3} \frac{P_{\Sigma}}{D};$$

$$\frac{\partial^2 P_{\Sigma}}{\partial D^2} = -\frac{2}{9} \frac{P_{\Sigma}}{D^2} = -\frac{2}{9} \frac{P_{\Sigma}}{D^2};$$

$$\frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial v} = -3 \rho_n \frac{D^{\frac{2}{3}} v^{\frac{2}{3}}}{C} = -3 \frac{P_{\Sigma}}{v};$$

$$\frac{\partial^2 P_{\Sigma}}{\partial v^2} = -\frac{2}{3} \rho_n \frac{D^{\frac{2}{3}} v^{\frac{2}{3}}}{C} = -\frac{2}{3} \frac{P_{\Sigma}}{v^2};$$

$$\frac{\partial^2 P_{\Sigma}}{\partial D \partial v} = -2 \frac{P_{\Sigma}}{D^{\frac{2}{3}} v^{\frac{2}{3}}} = -2 \frac{P_{\Sigma}}{D v}.$$

После подстановки найденных значений частных производных исходный дифференциал принимает вид

$$dP_{\Sigma} = \left(1 - \frac{P_{\Sigma}}{D}\right) dD - \frac{2}{3} \frac{P_{\Sigma}}{D} dD - 3 \frac{P_{\Sigma}}{v} dv + \frac{1}{9} \frac{P_{\Sigma}}{D^2} dD^2 - 2 \frac{P_{\Sigma}}{D v} dD dv - \frac{2}{3} \frac{P_{\Sigma}}{v^2} dv^2,$$

и, таким образом,

$$dD = \frac{dP_{\Sigma} + 3 \frac{P_{\Sigma}}{v} dv \left(1 + \frac{dv}{v}\right)}{1 - \frac{P_{\Sigma}}{D} - \frac{2}{3} \frac{P_{\Sigma}}{D} \left(1 - \frac{1}{6} \frac{dD}{D} + 3 \frac{dv}{v}\right)}.$$

Отбросив в знаменателе последней формулы второй член в скобках, который содержит неизвестную пока величину dD и не оказывает существенного влияния на результаты, найдем, вводя в рассмотрение уточненный частный коэффициент приращения водонесения:

$$dD = \Delta' \eta_{\Sigma};$$

$$\Delta' = dP_{\Sigma} + 3 \frac{P_{\Sigma}}{v} dv \left(1 + \frac{dv}{v}\right);$$

$$\eta_{\Sigma} = \frac{1}{1 - \frac{P_{\Sigma}}{D} - \frac{2}{3} \frac{P_{\Sigma}}{D} \left(1 + 3 \frac{dv}{v}\right)}.$$

Решая ту же задачу способом, изложенным в предыдущем параграфе, мы бы имели

$$\Delta D = \Delta \eta_0;$$

$$\Delta = \Delta P_{AB} + 3P_{AB} \frac{d\eta_0}{\eta_0};$$

$$\eta_0 = \frac{1}{1 - \frac{P_{AB}}{D} - \frac{2}{3} \frac{P_{AB}}{D}}.$$

Таким образом, более точные выражения искомых приращений веса и частного коэффициента приращений водонемешных отбрасываются от аналогичных выражений, полученных на базе дифференциального уравнения веса первого порядка, лишь присутствием множителей в скобках. Фигурирующие в них приращения Δ следует рассматривать как заданную величину. Уместно отметить, что при аналогичном до более точной метода приращений Δ одновременно увеличивается как приращение Δ , так и коэффициент η_0 . Поскольку скорость входит в алгебраическое уравнение веса в кубе, более точный учет значения этого параметра имеет чисто судостроительное значение.

Подставив в полученные формулы

$$1 + \frac{d\eta_0}{\eta_0} = \frac{v}{v_0}; \quad 1 + 3 \frac{d\eta_0}{\eta_0} = \left(\frac{v}{v_0}\right)^3,$$

где v и v_0 — скорость проектируемого судна и судна-прототипа v , соответственно найденное решение на более точное уравнение веса, найдем

$$\Delta' = \Delta P + \left(3 \frac{P_{AB}}{\eta_0} \Delta \eta_0 + 3 \frac{P_{AB}}{\eta_0} \Delta \eta_0\right) \frac{v}{v_0};$$

$$\eta_0 = \frac{1}{1 - \frac{P_{AB}}{D} - \frac{2}{3} \frac{P_{AB}}{D} - \frac{2}{3} \frac{P_{AB}}{D} \left(\frac{v}{v_0}\right)^2 - \frac{2}{3} \frac{P_{AB}}{D} \left(\frac{v}{v_0}\right)^2}.$$

Таким образом, при известном численном значении рассматриваемого коэффициента следует исходить из веса механизма и веса топлива, паростанам и соответственно с иной скоростью хода. В формулу для определения приращения Δ' следует внести поправочный множитель $\frac{v}{v_0}$ при члене, содержащем дифференциал скорости. Тот же результат был получен В. С. Дорным графическим путем [13] и Н. В. Виноградовым [10].

Изложим может быть иллюстрировано следующим примером. Допустим, что при пересчете веса механизма требуется определить отношение

$$\left(\frac{v}{v_0}\right)^3 \approx 1 + 1,2 \frac{3d\eta_0}{\eta_0} = 1,72,$$

Решая этот пример путем дифференцирования, найдем с погрешностью в 8%:

$$\left(\frac{v}{v_0}\right)^3 \approx 1 + \frac{3d\eta_0}{\eta_0} = 1,00,$$

если отбрасываемся малые величины порядка выше первого. Примерка более точный способ решения задачи, получим

$$\left(\frac{v}{v_0}\right)^3 \approx 1 + 1,2 \frac{3d\eta_0}{\eta_0} = 1,72,$$

чему соответствует погрешность в 0,5%.

§ 19. ЧИСЛЕННЫЙ ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОБЩЕННОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ВЕСОВ

В виде примера применения уравнения (76) рассмотрим, схематизируя вопрос, задачу о пересчете элементов линейного корпуса по прототипу. Элементы корпуса-прототипа и численные значения частных производных водонемешных корпуса по его элементам приведены ниже.

Таблица 20

Изменения постоянных весов

Постоянные веса, кг	Прототип	Задача
Прямые рубки	5000	2000
Боковые	5000	7500
Сайманы	200	300
Линия водонемешная	3000	1000
Итого	13 200	11 000

Для упрощения выкладки будем исходить из предположения, что исходные веса нагрузки прототипа уже направлены с учетом новых требований к скорости, району плавания, эффективности бронирования, а также некоторые изменения отдельных материалов. Таким образом, остается учесть лишь влияние изменений постоянных весов, которые приведены в табл. 20.

Частные производные функции F по главным размерам и коэффициентам общей полноты подбиты в табл. 21, причем для отдельных весов условно приняты весовые простые функциональные зависимости, позволяющие сократить число статей нагрузки и упростить выкладки.

Возвратимся на данных табл. 21, потребуем подставить равенство

$$\frac{D}{L} - \frac{\Delta F}{\Delta L} = 63 000 - 7770 = 55 230;$$

$$\frac{D}{L} - \frac{\Delta F}{\Delta L} = 260 - 163 = 97;$$

$$\frac{D}{B} - \frac{\Delta F}{\Delta B} = 1450 - 701 = 749;$$

$$\frac{D}{T} - \frac{\Delta F}{\Delta T} = 5230 - 1275 = 3955;$$

$$-\frac{\Delta F}{\Delta H} = +236.$$

После определения всех необходимых величин остается составить уравнение веса, используя формулу (76). Полученное уравнение

$$75 200\Delta L + 88\Delta B + 749\Delta B + 3960\Delta T + 236\Delta H = -3100$$

Sitronen

решается ниже, исходя из принятых условий:

$\Delta t = 0.006$

$$dT = -0.35$$

$$\frac{H + 4H}{T + 4T} = \frac{H}{T} = 1.62.$$

Из последнего соотношения следует, что

$\Delta H_{\text{vap}} = 40.7 \text{ kJ/mol}$

После подстановки значений dR , dT , dH уравнение масс переписывается следующим образом:

$$\Delta L + 19.7\text{dB} = -37.0.$$

В качестве последнего условия, необходимого для решения уравнений, зададим отношение длины проектируемого корабля к его ширине известным

$$\frac{I + dI}{R + R} = 7.07$$

000000

$$dL = 7.5\text{dB} - 7.5$$

Подставляя значения dL в уравнение выше, найдем

$$-dL \approx -12.9 \text{ m};$$

$$dB_{eq} = 0.7 \text{ dB}$$

Таким образом, приходим к следующим элементам проектируемого кода:

$\lambda = 0.60 \mu\text{m}; \quad T = 9.2 \mu\text{s};$

$$L = 236^\circ K; \quad H = 15,4 \text{ м};$$

$$M = 23,7 \text{ м}; \quad D = 45 \text{ 300 м};$$

$\tau = 1.62$

Зная, как следует изменить элементы корабля, встроило на основе табл. 20 и 21 пересчитанную нагрузку прототипа. Соответствующим расчетным показателям в табл. 22.

Приведенные в табл. 21 данные могут быть также использованы для определения коэффициентов расширения и сжатия металла по разным размерам и коэффициенту полноты, которые оказывались разными

$$\eta_{\text{eff}} = \frac{1}{1 - \frac{7775 - 0.602}{50,000}} = 1.10,$$

$$r_g = \frac{1}{1 - \frac{163,248}{50,000}} = 5.26\%$$

$$V_A = \frac{1}{1 - \frac{701 - 24,4}{50.000}} = 1,97,$$

$$v_T = \frac{1}{1 - \frac{1273 \cdot 9,55}{50\,000}} = 1,32$$

Таблица 22

Пересчет нагрузки прототипа

Разделы и типы нагрузки	Вес груза, т	$\frac{dP}{dL}$	$\frac{dP}{dL}$	$\frac{dP}{dL}$	$\frac{dP}{dL}$	$\frac{dP}{dL}$	Пересчет, т	Итого, т
Корпус ита, прожекторная установка СРТ	7500	—	-130	-100	-200	+200	-1000	6500
Масса, прожекторная установка СРТ	3750	—	-140	-80	—	—	-250	3500
Масса, прожекторная установка СРТ	2700	—	-140	—	—	-140	-300	2400
Вспомогательные установки ЛУ	—	—	—	—	—	—	—	—
Вспомогательные установки	6700	—	-200	—	—	—	-300	6400
Горючее	1500	—	—	—	—	—	-30	1470
Горючее	5700	—	-220	—	—	—	-400	5300
Горючее	2600	—	—	—	—	—	-600	2000
Вспомогательные установки	8000	—	—	—	—	—	-1000	7000
Снабжение	500	—	—	—	—	—	-100	400
Резерв	2000	+10	-100	-40	-70	—	-100	1930
Топливо, запасная масса	4000	+30	-120	-60	-120	—	-250	3750
Запас продовольствия	1000	—	—	—	—	—	—	1000
Итого	50 000	—	—	—	—	—	-4000	46 000

§ 20. ЧИСЛЕННЫЙ ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА НОРМАНА

Приведенная ниже задача сводится к определению по прототипу элементов транспортного судна, нагрузка которого приведена в табл. 22. Требуется уменьшить скорость судна-прототипа на 5% и район плавания на 10%.

При этом вес перевозимого груза должен быть уменьшен на 1000 т. Столбец V в табл. 22 содержит приведенные относительные веса на моментом, фигурирующие в знаменателе формулы (94), выражающей коэффициент Нормана. Эти множители указаны в столбце IV таблицы.

Суммируя эти произведения, находим

$$\frac{dP}{dD} = 0,394.$$

Таким образом, коэффициент Нормана равен

$$\eta_n = \frac{1}{1 - 0,394} = 1,63.$$

В столбце VI приведены дифференциалы $[dP]_0$, подсчитанные в соответствии с формулами (95) следующим образом:

$$[dP]_{01} = 0;$$

$$[dP]_{02} = 670 - 3 \cdot 0,05 = 600 \text{ т};$$

$$[dP]_{03} = 2250 (0,1 + 2 \cdot 0,05) = 450 \text{ т}.$$

Таблица 23

Пересчет нагрузки транспортного судна

Разделы нагрузки	Вес груза, т	Вес прототипа, в долях D	Множитель	$\frac{dP}{dD} = \frac{1}{D} \cdot \frac{dP}{dD}$	$[dP]_0$	$\frac{dP}{dD} = \frac{dP}{dD} = V \cdot \frac{dP}{dD}$	$dP = V + V \cdot \frac{dP}{dD}$	Итого, т
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Корпус	5450	0,250	1,0	0,250	—	-210,0	-210,0	5240
Механизмы	670	0,036	0,667	0,024	+100,0	-30,0	+70,0	740
Топливо	2250	0,120	0,567	0,080	-450,0	-60,0	+390,0	2540
Итого	8370	—	—	0,394	+550,0	—	+260,0	8630
Груз	10 000	—	—	—	-1000	—	-1000	9000
Снабжение	110	—	—	—	—	—	—	110
Запас продовольствия	300	—	—	—	—	—	—	300
Итого	10 410	—	—	—	-1000	—	-1000	9410
Нового	18 780	—	—	—	-450	—	-740	18 040

Таким образом,

$$[dP]_0 = \sum [dP]_0 = +550 \text{ т}.$$

Просуммировав эти произведения с заданным значением весов, равным -1000 т, находим, как это указано в таблице,

$$d = [dP]_0 + dP = -1000 + 550 = -450 \text{ т}.$$

Это соответствует уменьшению водоизмещения

$$dD = -[dP]_0 + dP = 1,65 (-450) = -740 \text{ м}^3$$

и, следовательно,

$$D = 18 780 - 740 = 18 040 \text{ м}^3.$$

В столбце VII таблицы определены дополнительные приращения весов, связанные с уменьшением водоизмещения. Для этого из столбца V умножен на $dD = -740 \text{ м}^3$. Полное приращение весов вычисляется в столбце VIII путем суммирования весов столбцов VI и VII.

Водоизмещение, полученное в столбце IX путем арифметического суммирования весов, совпадает с найденным путем водоизмещения 18 040 м³.

ВМЕСТИМОСТЬ ГРАЖДАНСКИХ СУДОВ

§ 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОММЕРЧЕСКИХ ГРУЗАХ
И ГРУЗОВОЙ ВМЕСТИМОСТИ

Грузы, перевозимые морем, делятся на сухие, наливные и газообразные.

Среди сухих грузов различают: тарные, штучные, навалочные и насыпные (сыпучие).

Тарными называются грузы, которые перевозят в упаковке (таре). В качестве тары используют ящики, мешки, бочки, бидоны, бутылки и пр.

Штучные грузы перевозят без упаковки и принимают на судно не по весу, а по счету мест. Так можно транспортировать машины, автомобили, станки, металлические конструкции.

Навалочными называются грузы, которые подаются на судно навалом без счета мест, например уголь, руда, лес, металл в чушках и слитках, камень. Их принимают к перевозке по весу за исключением леса, который учитывается по объему и в зависимости от категории измеряется в стандартах, ящиках или лодках. Наделен из леса, перевозимые в связках, как например клеенка или паркетный набор, рассматриваются как штучные грузы.

К числу насыпных грузов относятся хлеб и зерно, льняное и хлопковое семя, посылонки и пр., если они перевозятся насыпью, а не в мешках. Насыпные грузы отличаются от навалочных большей сыпучестью и меньшими размерами отдельных частей.

Навалочные и насыпные грузы обладают рядом сходных признаков, которые дали основание отнести эти грузы к одной категории и назвать массовыми. Существенное значение для проектирования имеют следующие их особенности.

Массовые грузы транспортируются большими партиями. Это способствовало созданию специализированных судов, предназначенных для перевозки руды, угля, зерна, леса. Наряду с этим массовые грузы перевозят и на обычных судах нерегулярного плаванья (трампах). В мировой практике при перевозке массовых грузов широко применяется фрахтовка судов. Иногда фрахтуются отдельные грузовые трюмы.

Массовые грузы относятся большей частью к категориям тяжелых. Поэтому они не нуждаются в трюмах с большой кубатурой, что дает основание строить для их перевозки суда с минимальным наводным бортом. Сказанное относится и к легким массовым грузам, которые перевозятся частично в трюмах и частично на верхней палубе.

Вследствие относительной дешевизны массовых грузов, суда, предназначенные для их перевозки, проектируются с меньшими скоростями хода, чем суда, на которых перевозятся более дорогие тарные грузы. Это оправдывается экономическими расчетами, если они выполняются с учетом оборотных средств, заключенных в грузах во время их транспортировки (см. § 2 главы децатой).

Совокупность тарных или тарных и штучных грузов различной композиции, отличающаяся весом, размерами и упаковкой, называют *ассортиментом*, или, иначе говоря, *смешанным грузом*. В отличие от массовых генеральных грузов перевозятся обычно небольшими партиями на судах линейного плаванья, причем транспортировка груза оценивается по тарифу. Для систематической перевозки генеральных грузов, которые требуют большего числа грузовых помещений и большей кубатуры, чем массовые, предназначаются двухпалубные и трехпалубные суда с избыточным наводным бортом, и в частности шельтерные суда, особенно широко используемые за границей.

Деление сухих грузов на тарные, штучные, навалочные и насыпные соответствует классификации, принятой в книге А. Ю. Пакратова [35] и других источниках. Некоторые авторы отходят от принятой позиции «тарные» и «штучные» грузы, что вряд ли рационально. Представляется целесообразным ввести дополнительно в классификационную схему группы, охватывающие рефрижераторные грузы, грузы, перевозимые в пакетах, контейнерах и трейлерах (полуприцепах), а также живой скот и птиц.

Независимо от рассмотренной классификации различают длиномерные грузы (длиной более 9 м), тяжеловесы (с весом одного куста более 3 т), опасные грузы (способные образовывать взрывчатые смеси, легко воспламеняющиеся, ядовитые и пр.).

Основную массу наливных грузов составляет нефть и продукты ее перегонки (бензин, керосин, мазут).

Количество груза данной композиции, которое может быть погружено на судно, зависит от его грузоподъемности и грузовой вместимости. Грузовая вместимость определяется объемом грузовых трюмов, который подсчитывается с учетом объема грузовых люков. Вместимость определяется исходя из двух предположений о роле перевозимого груза. В соответствии с этим различают вместимость для перевозки сыпучих грузов и вместимость для перевозки тарного (липового) груза. Та и другая отличаются от теоретической вместимости.

В дальнейшем под теоретической вместимостью сузгрузового

судна мы будем понимать объем трюмов, считая от настила двойного дна и междудонного листа до внутренней поверхности наружной обшивки и палубного настила. Вместимость по сыпучему грузу (рис. 25) может быть получена из теоретической вместимости после вычета объемов, занимаемых корпусом, и пространства, занимаемого пайолом и далами. Под объемом дала мы будем понимать объем, простирающийся от междудонного листа до деревянного настила, перекрывающего скуловые кницы.

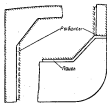


Рис. 25. Заполнение трюмов штучным и сыпучим грузом.

При определении вместимости нефтяных нужно учитывать лишь телесность набора и ввести запас по кубатуре, необходимый для тепловое расширение нефтепродуктов.

Кубатура рефрижераторных трюмов подсчитывается за вычетом объема изоляции трюмов и объема, который не может быть использован для груза из-за элеваторов, трубопроводов и вентиляционных каналов.

Как это можно видеть из табл. 24, в которой приведены данные о вместимости нескольких грузовых и грузо-пассажирских судов, вместимость, подсчитанная по тарному грузу, отличается от вместимости, подсчитанной по сыпучему грузу, в среднем на 8—10%. В свою очередь, вместимость по насыпному грузу отличается от теоретической вместимости примерно на 5%. Вычет для перепада от теоретической вместимости к вместимости рефрижераторных трюмов достигнет 25—35%.

Наряду с грузовой вместимостью мы будем оперировать понятием подпалубная вместимость, под которой будем понимать объем

корпуса, исключая объем машинного отделения, измеренный от двойного дна до верхней палубы так, как это указано для сыпучих грузов, но без учета грузовых люков, объем которых в каждом частном случае можно легко подсчитать в соответствии с их габаритными размерами. В подпалубную вместимость не входит также объем грузовых помещений в надстройках, если такие помещения имеются на судне.

Вычеты из теоретической вместимости, учитывающие телесность набора, а также объемы пайола и трубопроводов, складных трюмов и т. п., выражаются приблизительно следующими цифрами (в процентах):

Вычеты для грузовых трюмов:	
« телесность набора	1,0—2,5
« пайола, пайолов и пр.	2,5—3,5
Деталировка поддона и толщинные	1,0—1,5
Грузовые люки нефтяные	1,5
Деталировка и толщинные поддонных цистерн	2,5—3,0
« топливных цистерн:	
« без зазоров	2,0—2,5
« со зазорами	2,5—3,0

При определении необходимого объема топливных цистерн и грузовых танков нужно вносить следующие запасы (в процентах):

На расширение нефтепродуктов в грузовых танках	
« жидкого топлива	2,5—3,5
« газообразного остатка топлива	2,0—3,0
« неуглеводородного остатка топлива	2,0—3,0

Отношение вместимости трюмов к частой грузоподъемности судна называется удельной вместимостью. По аналогии с абсолютной вместимостью различают удельную вместимость по сыпучему и тарному грузу.

Фактический объем, необходимый для перевозки весовой единицы груза, уложенного в спариванного так, как это общепринято, мы будем называть его *удельной погрузочной кубатурой*.

Удельная погрузочная кубатура груза изменяется в значительных пределах от 0,2 м³/т — для сажи в чупках до 15—20 м³/т — для автомашин в сборе (для автомашин в шинах 5—10 м³/т). Однако эти крайние пределы мало показательны, так как грузовые суда проектируются исходя из средней удельной погрузочной кубатуры грузов, характерных для линий, которые должны обслуживаться судном. Поэтому удельная вместимость отдельных грузовых судов колеблется в значительно более узких пределах, чем удельная погрузочная кубатура грузов. Среди специализированных судов, предназначенных для перевозки вполне определенных грузов, также отсутствуют суда с удельной вместимостью, приближающейся к приведенным цифрам.

Суда с минимальным надводным бортом, предназначенные для перевозки массовых грузов, имеют удельную вместимость порядка

1,4—1,5 м³/м. Используемые для перевозки генеральных грузов нештатные суда и суда с избыточным надводным бортом (без обмерных отверстий) проектируются с более высокой удельной вместимостью трюма. Она лежит большей частью в пределах 1,8—2,2 м³/м, причем наиболее характерна цифра 2,0 м³/м.

В морских транспортных операциях Советского Союза первое место (по объему перевозок) занимает перевозка нефти. Сухогрузный флот в основном занят перевозкой массовых грузов, и в первую очередь угля, руды, минерально-строительных грузов, леса, зерна.¹

И. П. Комсток в работе [53] приводит статистические данные об удельной погрузочной кубатуре экспортных и импортных судов США, перевозимых из грузовых и товарно-пассажирских судов СССР. Не останавливаясь на подробных таблицах и графиках, приведенных в упомянутой работе, отметим, что вместимость p заполнения трюмов грузами с удельной погрузочной кубатурой меньшей или равной r выражается по данным Комстока следующими цифрами (в процентах):

$r < 1,3$	1,4	1,7	2,0	2,3	2,6
p	33	35	70	76	86

Чаще всего перевозились грузы со следующей удельной погрузочной кубатурой:

r	1,36—1,43	1,70	2,06—2,08	2,76	4,27
Число случаев, %	27,0	10,5	7,2	4,7	4,2

Максимальная удельная погрузочная кубатура оказалась равной 5,3 м³/м.

В тех случаях, когда судно выходит в рейс с осадкой, соответствующей регламентированному надводному борту, и его трюмы целиком заполнены грузом, средняя удельная погрузочная кубатура груза равна удельной вместимости судна. Такое совпадение наблюдается редко. Обычно же не используются полностью либо грузоподъемность судна (при легких грузах) либо его грузоемкость.

В процессе разработки проекта объема и абрисов центра тяжести отдельных трюмов и цистерн определяются по мере сложности. Проектируя янтра сложности в отличие от предварительной, рассмотренной в § 1 главы четвертой, строятся путем детальных расчетов с использованием теоретического и конструктивных чертежей. На их основе разрабатывается чертеж корпуса судна, на котором наружу с наружными обводами наносится внутренняя поверхность двойного дна, междубортный лист, обводы по поверхности рыбных и внутренней кромки бруса, скуловые и бимсовы кницы. Представление о таком чертеже можно получить по рис. 26, на котором, чтобы не загромождать чертеж, показаны лишь три поперечных сечения.

¹ Более подробные данные о структуре отечественных морских перевозок можно найти в книге [19] и в некоторых других работах, посвященных экономике морского транспорта.

Рассматриваемый чертеж позволяет подсчитать площади поперечных сечений, соответствующих теоретической вместимости трюмов и вместимости трюмов по шутному грузу, а также площади сечений дна, двойного дна, местных цистерн и отдельных помещений. Для получения вместимости по сыпучему грузу вычит из телесности набора, может быть уточнен с помощью таблицы загрузки судна путем перехода от весов к объемам.

Для определения положения центра тяжести трюмов и цистерн по высоте предварительно строятся вспомогательные кривые возмещения центра тяжести поперечных сечений отдельных отсеков.

В качестве информационного материала для клиента и пароходства агентств дается так называемый грузовой план. На грузовом плане, содержащем схематический продольный разрез судна и схематические чертежи палуб, указываются объемы и положение центров тяжести объемов отдельных отсеков. То же сведения обычно дается и в табличной форме.

Нередко на грузовом плане приводится также ряд других информационных данных, в частности грузовой шкалы, схема расположения грузовой марки и т. п.

Oриентировочное представление о распределении кубатуры на сухогрузных судах с центральным машинным отделением можно себе составить по следующим соотношениям.

Объем трюмов по сыпучему грузу лежит обычно в пределах

$$V = (0,50 \div 0,60) LBH = (0,60 \div 0,75) (L - l_m) BH,$$

где l_m — длина машинного отделения.

По Бастарду [52]

$$\frac{V}{LBH} = 3 + (0,08 \div 0,10),$$

где l — суммарная длина трюмов;

$H_{тр} = H - h_n$ — глубина трюма;

h_n — высота двойного дна.

Полный объем судна и объемы отдельных отсеков выражаются в процентах от водоизмещения следующими цифрами:

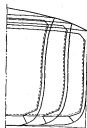


Рис. 26. Чертеж корпуса для расчета вместимости отсеков.

Полный объем судна	120—140
Двойное дно	8—11
Форпик и актерника	4—6
Коридор гребного вала	11/2—2
Датчики (одна-две пары)	4—12

На мелкоосадочных судах смешанного плавания объем двойного дна выражается более высокими цифрами, достигая 15—25% от водоизмещения. Как это отмечалось в главе четвертой в связи с рассмотрением вопроса о балластировке судна, при кормовом расположении машинного отделения приходится обычно несколько увеличивать объем балластных цистерн. Несмотря на это, вместимость судна увеличивается в среднем на 2—5% из-за отсутствия коридора гребного вала и более выгодной конфигурации грузовых трюмов.

На относительно полных нефтовозах с нормальной осадочностью объем грузовых трюмов равен приблизительно 99—100% от производства *ВН*. При отсутствии осадочности эти цифры падают до 96—98%. Для быстроходных мелких полных нефтовозов рассматриваемый коэффициент выражается более низкими цифрами.

Ниже напомним способы, позволяющие в начальных стадиях разработки проекта определить с достаточной точностью вместимость сухогрузных судов с различным расположением машинного отделения по длине судна, а также вместимость нефтовозов. Приведенные формулы могут быть использованы и при определении элементов проектируемого судна, если для этой цели наряду с другими уравнениями применяется одно из уравнений вместимости, охарактеризованных подробно ниже.

Идея использования уравнения объемов при проектировании гражданских судов и военных кораблей была впервые развитая В. Л. Поздониным в ряде работ, в частности в курсе [38]. В другой постановке вопроса задача, поставленная В. Л. Поздониным, была рассмотрена Е. С. Толодиным [49] применительно к каботажным судам и автором настоящей книги применительно к сухогрузным и наливным судам [28] и [31].

Рассматриваемому вопросу посвящены также работы Л. Г. Соколова [46] и Давидардта [54].

§ 2. ОБЪЕМ ФОРПИКА, АХТЕРНИКА И КОРИДОРА ГРЕБНОГО ВАЛА

В дальнейшем изложении вместимость сухогрузных судов с центральным расположением машинного отделения определяется путем вычета из подпалубной вместимости судна $W_{\text{св}}$ (см. § 1) объема помещений, не используемых для перевозки груза. В соответствии с этим в настоящем параграфе изложен способ, позволяющий определять суммарный объем форпика, актерника и коридора гребного вала в процентах от объема $W_{\text{св}}$.

Вопрос рассматривается применительно к одновинтовым судам. Относительный объем кормового схода и коридора гребного вала может рассматриваться в первом приближении как величина постоянная. Остальная же часть рассматриваемого объема зависит от суммарной длины форпика и актерника и коэффициента продольной полноты. Вместо последнего в расчетные формулы введен коэффициент общей полноты, незначительно отличающийся по абсолютной величине от коэффициента продольной полноты.

Анализ безразмерных стрелок по шпангоутам и проектных штурмовок приводит к выводу, что отношение объема пиков и коридора гребного вала к полной вместимости судна может быть выражено в процентах зависимостью

$$\frac{e_n}{W_{\text{св}}} = C \frac{L_n}{L} + 3,0,$$

где e_n — объем пиков и коридора гребного вала;
 L_n — суммарная длина форпика и актерника;
 C — численный коэффициент.

В соответствии с этим для определения подпалубной вместимости с учетом объема e_n предлагается формула

$$W_1 = L_n W_{\text{св}}.$$

$$L_n = 1 - 0,01 \frac{e_n}{W_{\text{св}}} = 0,97 - \frac{C}{100} \frac{L_n}{L}. \quad (101)$$

Коэффициент C в зависимости от коэффициента общей полноты принимает следующие значения:

$\frac{L_n}{C}$	0,65	0,70	0,75	0,80
	20	25	30	40

Ниже для трех судов с центральным расположением машинного отделения расчетные цифры сопоставлены с фактическими данными.¹

	«Алешко»	«Колос»	«Ленинский комсомолец»
$L_n + L$	0,696	0,700	0,685
L_n — по расчету	0,118	0,118	0,141
L_n — фактически	0,941	0,580	0,941
Погрешность, %	0,940	0,948	0,955
	-0,1	+0,4	-1,5

§ 3. ВМЕСТИМОСТЬ ДВОЙНОГО ДНА

При определении вместимости днищевых цистерн приближенным расчетом возникает затруднение, поскольку двойное дно имеет обычно местные подъемы или уступы, величина которых в началь-

¹ Практические данные по сухогрузным судам отечественной постройки, приведенные в настоящей главе, заимствованы из статьи [46], однако некоторые цифры скорректированы по проектным материалам.

ных стадиях разработки проекта еще неизвестна. Это обстоятельство можно учесть, вводя в расчетные формулы практические поправочные коэффициенты. В соответствии с этим будем исходить из предположения, что двойное дно ограничено горизонтальной плоскостью, параллельной основной плоскости.

Относительный объем двойного дна α_0/V входит в расчетные формулы, приведенные ниже, в виде множителя $(1 - \frac{\alpha_0}{V})$. При практических допущениях этот множитель может быть выражен в функции отношения α/b и относительной высоты двойного дна b_0/T зависимость

$$1 - \frac{\alpha_0}{V} = \frac{\alpha}{b} \left(1 - \frac{b_0}{T}\right) - \frac{1}{2} \frac{\alpha}{b} \left(\frac{\alpha}{b} - 1\right) \left(1 - \frac{b_0}{T}\right)^2 = 0,025. \quad (102)$$

Равенство (102), в котором численное слагаемое учитывает расхождение между теоретическими и практическими цифрами, вытекает из формулы (131), приведенной в главе седьмой³.

Минимальная допустимая высота двойного дна определяется конструктивными правилами Регистра СССР в зависимости от длины судна [25]. Если ширина и осадка судна отличаются от указанных в таблице, то табличная высота двойного дна должна быть умножена на коэффициент

$$\lambda = \left(\frac{b}{b_0}\right)^{\frac{1}{3}} \frac{T}{T_0},$$

если он больше единицы. В последней формуле индексом T отмечены табличные цифры.

Для получения достаточно жестких нижних пределов двойное дно часто делается выше, чем это требуется по правилам Регистра СССР.

Ниже приведены выборочные цифры, заимствованные из упомянутых правил:

L, м	40	60	80	100	120	140	160	180
B, м	—	—	14,0	16,0	17,7	19,2	20,7	22,2
T, м	—	—	6,8	6,8	7,5	8,3	9,0	9,5
b_0 , мм	680	720	800	880	960	1040	1120	1200
$\frac{b_0}{T}$, %	—	—	12,1	12,9	12,6	12,5	12,5	12,6

Ниже для ряда грузовых судов с центральным и кормовым расположением машинного отделения расчетные значения множителя

³ Формула (102) может быть замещена более простой, но менее точной эмпирической формулой

$$1 - \frac{\alpha_0}{V} = 0,975 \left(\frac{\alpha}{b}\right)^{\frac{1}{3}} \left(1 - \frac{b_0}{T}\right).$$

$\alpha_0 = \left(1 - \frac{\alpha_0}{V}\right)$, подсчитанные по формуле (102), сопоставлены с его фактическими значениями α_0 .

	«Амур»	«Колос»	«Дальневосточный»	«Дальний»	Проект 100000
$\frac{\alpha}{b}$	0,696	0,700	0,655	0,672	0,660
$\frac{\alpha}{b}$	1,17	1,19	1,17	1,13	1,17
$\frac{b_0}{T}$	0,144	0,145	0,154	0,147	0,146
α_0	0,903	0,921	0,883	0,888	0,902
α_0	0,912	0,914	0,883	0,891	0,886

Для первых четырех судов погрешность не выходит из пределов $\pm 1\%$, а для последнего равна $\pm 4,2\%$.

Судя по приведенным цифрам в среднем для морских грузовых судов

$$\alpha_0 = 0,1V.$$

§ 4. ДЛИНА МАШИННОГО ОТДЕЛЕНИЯ

В формулах для определения грузовой вместимости, приведенных ниже, фигурирует относительная длина машинного отделения, измеренная в долях от длины между перпендикулярами. Это отношение изменяется в широких пределах в зависимости от типа машинной установки, мощности и числа оборотов главного двигателя, расположения машинного отделения по длине судна. При кормовом расположении машинного отделения существенное значение имеет коэффициент продольной полноты и характер обводов в кормовой полонезе судна.

В начальных стадиях разработки проекта длина машинного отделения обычно может быть назначена с достаточной точностью на основе данных по подходящим прототипам. Общее представление о рассматриваемых соотношениях можно получить из табл. 25, в которой указаны более или менее характерные пределы изменения длины машинного отделения в процентах от длины судна. Таблица составлена по данным, приведенным в статье [67], причем крайние мало показательные цифры отброшены.¹

Отдельно рассмотрены нефтеналивные и судоходные суда с различными типами машинных установок, расположенных в средней части судна и кормовой оконечности. Там, где это оказалось возможным, суда среднего и большого тоннажа сопоставлены с малыми судами.

В табл. 26, составленной А. В. Бронниковым, приведены данные для определения длины машинного отделения исходя из размеров главных двигателей.

¹ Аналогичные данные можно найти в ряде других работ, в частности в упомянутой выше статье [54].

Таблица 25

Длина машинных отделений в процентах от длины судна между перпендикулярами (суда одностороннего)

Тип судна и главных двигателей	При расположении машинного отделения	
	центральный	кормовой
Сухогрузные суда		
Паровая поршневая машина ($L = 82-125$ м)	16-20	—
Дизель ($L = 95-144$ м)	12-16	15-17
» ($L = 33-90$ м)	14-20	15-20
Два дизеля с редуктором ($L = 73-150$ м)	13-16	13-23
Дизель-электрическая установка ($L = 75-120$ м)	15-18	—
Паровые турбины ($L = 136-161$ м)	13-16	—
Нефтеналивные		
Дизель ($L = 142-189$ м)	—	16-19
» ($L = 38-83$ м)	—	17-21
Турбины ($L = 154-220$ м)	—	15-17

Таблица 26

Длина машинных отделений в зависимости от их расположения и размеров главных двигателей

Тип главных двигателей	При расположении машинного отделения	
	центральный	кормовой
Паровая машина	$(2,2-2,5) \Sigma D_d$	—
» турбина	$(1,5-2,2) l_d$	—
Дизель	$(3,5-4,5) l_d$	—
Дизель с механической и электрической передачей	$(1,2-1,3) l_d$	$(2,6-3,6) l_d$
	$(1,6-2,0) l_d$	$(2,6-3,6) l_d$
Обозначения: ΣD_d — суммарный диаметр цилиндров паровой машины; l_d — длина турбоузлового агрегата; l_d — длина турбины; l_d — длина главного дизеля.		

Практические данные, приведенные в настоящем параграфе, могут быть использованы лишь для грубых прикидок. Поэтому при отсутствии подходящих прототипов для определения длины машинного отделения нужно разработать предварительный эскиз общего расположения механизмов.

§ 2. ВМЕСТИМОСТЬ ГРУЗОВЫХ СУДОВ С ЦЕНТРАЛЬНЫМ МАШИНЫМ ОТДЕЛЕНИЕМ

Полная вместимость судна по случайному грузу W без учета объема грузовых люков и грузовых помещений в пределах надстроек может быть выражена равенством

$$W = k_s W_{\text{м}} - W_{\text{л}}, \quad (103)$$

где

$$W_{\text{м}} = k L B H_{\text{м}};$$

$$W_{\text{л}} = k_{\text{л}} l_{\text{м}} B H_{\text{л}}.$$

В приведенных формулах приняты следующие обозначения:

$W_{\text{м}}$ — подпалубная вместимость, подсчитанная так, как это указано в § 1;

$W_{\text{л}}$ — объем машинного отделения;

k — коэффициент полноты подпалубного объема;

$k_{\text{л}}$ — коэффициент полноты объема машинного отделения;

$l_{\text{м}}$ — приведенная длина машинного отделения;

$H_{\text{л}} = H - A_{\text{г}}$ — глубина трюма.

Коэффициент $k_{\text{л}}$, учитывающий объем люков и коридора гребного вала, определяется по формуле (101).

Для упрощения начертания формул мы будем включать в объем машинного отделения объемы топливных цистерн и дизельного, расположенных в пределах цилиндрической атаки.¹ В соответствии с этим длины этих отсеков должны быть включены в длину $l_{\text{м}}$. Если цистермы не доходят до бортов и верхней палубы, а также если машинное отделение ограничено переборками с уступами, необходимо соответственным образом уменьшить длину $l_{\text{м}}$, рассмотрев ее как приведенную длину машинного отделения и цистерм.

Объемы некоторых цистерн, имеющих неправильную конфигурацию, неудобно суммировать с объемом машинного отделения. Для исключения таких цистерн из грузовой вместимости можно ввести коэффициент, аналогичный коэффициенту $k_{\text{л}}$, умножив на него произведение $k_{\text{л}}$. Этот дополнительный коэффициент (назовем его k) должен рассматриваться как заданная величина. Для некоторых судов, имеющих цистермы под платформой, ограничивающей коридор гребного вала, коэффициент k , учитывающий объем этих местных цистерн, лежит в пределах

$$k = 0,960 - 0,985.$$

Коэффициент

$$k = \frac{W_{\text{л}}}{L B H_{\text{л}}}$$

¹ Можно выделять объемы топливных цистерн и дизельного и вычитать их из отдельной величины.

может быть представлен в виде суммы

$$k = k_0 + \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4, \quad (104)$$

где

$$k_0 = \frac{W_0}{LBN_{\text{тр}}}$$

Под W_0 понимается теоретическая вместимость корпуса выше двойного дна, измеренная до уровня верхней палубы у бортов в районе мидель-шпангоута.² Коэффициенты Δ_1 , Δ_2 , Δ_3 учитывают соответственно объемы в пределах седловатости, погниб бимсов и развала бортов выше грузовой ватерлинии. Коэффициент Δ_4 представляет собой поправку, учитывающую телесность набора, объем льда между деревянным настилом по скуловым клингам и междудонным листом, объемы трубопроводов, трапов и т. п.

В соответствии с практическими данными, приведенными в § 1, можно принять для сухогрузных судов

$$\Delta_4 = -5\%.$$

На судах рассматриваемого типа машинное отделение, как общее правило, расположено в пределах цилиндрической астаки. В соответствии с этим коэффициент полноты объема машинного отделения без учета объема в пределах льда и погниб бимсов, а также телесности набора равен практически единице. Объем льда выше уровня настила дается для равен примерно 1,5%, а объем в пределах погниб бимсов примерно 3,5% от объема машинного отделения. С другой стороны, для того, чтобы привести объем машинного отделения к объему по сыпучему грузу, нужно ввести вычит на полный объем льда и телесность набора, равный, как это было принято выше, 5%. В соответствии с изложенным коэффициент полноты объема машинного отделения может быть принят равным

$$k_m = 0,015 + 0,035 - 0,05 + 1 \approx 1,0.$$

Поскольку оба коэффициента полноты k и k_m относятся к сыпучему грузу, формула (103) приводится к виду

$$W = (kk_0 - k_m \frac{k_0}{L}) LBN_{\text{тр}}. \quad (105)$$

Остановимся теперь на коэффициенте k_0 .

Как это показано в § 6, коэффициент k_0 может быть подсчитан по формулам

$$k_0 = k'_0; \\ k'_0 = 1,015 - \frac{1}{2} \left(\frac{s}{s_0} - 1 \right) \left(2 - \frac{H_{\text{тр}}}{T} \right). \quad (106)$$

² Предполагается, что выше грузовой ватерлинии борты судна вертикальны.

Кривые значений коэффициента k'_0 в функции коэффициента s/s_0 при отношении $H_{\text{тр}}/T$ в качестве параметра приведены на рис. 27.

Другая формула для определения коэффициента k_0 может быть получена из равенства

$$W_0 = V + S(H - T) - v_2,$$

где V — объемное подкапешение;

$S = sL_{\text{в}}$ — площадь грузовой ватерлинии;

$L_{\text{в}}$ — длина судна по грузовой ватерлинии.

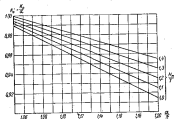


Рис. 27. Значения коэффициента k'_0 .

Разделив последнее равенство почленно на $LBN_{\text{тр}}$, найдем

$$k_0 = \frac{W_0}{LBN_{\text{тр}}} = \varepsilon \frac{T}{H_{\text{тр}}} \left[\left(1 - \frac{v_2}{V} \right) + \frac{\pi}{6} \frac{L_{\text{в}}}{L} \left(\frac{H}{T} - 1 \right) \right]. \quad (107)$$

Коэффициент v_2/V может быть подсчитан по формуле (102). В среднем для морских грузовых судов

$$\left(1 - \frac{v_2}{V} \right) = 0,90; \quad \frac{L_{\text{в}}}{L} = 1,025.$$

Остановимся теперь на поправочных коэффициентах, входящих в формулу (104).

Поправка, учитывающая седловатость (см. § 6), выражается записью

$$\Delta_1 = \Delta'_1 \frac{k_{\text{ср}}}{k_{\text{ср}} k_0},$$

где $k_{\text{ср}}$ — фактическая средняя седловатость судна;

$k_{\text{ср}} k_0$ — средняя седловатость по правилам о грузовой марке.

Коэффициент Δ'_1 определяется (в процентах) по формуле

$$\Delta'_1 = 1,025 \frac{k_{np}}{N_{np}} \frac{a_2}{3(\beta - 2a_2)} \quad (106)$$

где a_2 — коэффициент полноты палубы. Условно можно принять $a_2 = 1,05a$.

Средняя сдвигатость по правилам о грузовой марке выражается зависимостью (в метрах)

$$k_{cp} = 1,25 \frac{L}{100} + 0,381.$$

Если сдвигатость судна значительно отличается по форме от квадратичной параболы, целесообразно заменить поправочный множитель $k_{np}/(A_{np})_0$ отношением M/M_0 , где M — мера сдвигатости, или, иначе говоря, высота прямоугольника, длина которого равна длине судна, а площадь равна площади сдвигатости. Мера сдвигатости по правилам о грузовой марке в три раза меньше средней сдвигатости и равна

$$M_0 = 0,417 \frac{L}{100} + 0,127.$$

Надбавка, учитывающая погиб бимсов (см. § 6), может быть подсчитана по формуле (в процентах)

$$\Delta_3 = 1,36 \frac{B}{N_{np}} a_2^3.$$

Надбавка Δ_2 , учитывающая влияние развала бортов на деформацию материала, равна приблизительно

$$\Delta_2 = 0,3\%.$$

если коэффициент k'_0 определяется по формуле (106), и

$$\Delta_2 = 0,8\%.$$

если коэффициент k'_0 определяется по формуле (107).

Для рассмотренных судов в среднем

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4 = 2,0\%.$$

если коэффициент k'_0 определяется по формуле (106). Это дает основание пользоваться в повседневной практике формулой

$$k = 100k'_0 + 2,0. \quad (109)$$

определяя коэффициент k'_0 с помощью диаграммы, приведенной на рис. 27.

В качестве примера в табл. 27 и 28 для четырех сухогрузных судов приведены значения поправочных коэффициентов и коэффициента k , подсчитанные по формулам (106), (107) и (109). Во всех случаях расчетные значения коэффициента k удовлетворительно согласуются с фактическими значениями этого коэффициента.

Таблица 27

Поправочные коэффициенты, %

Наименование судов	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4	Δ
«Андрейка»	5,1	2,3	0,3—0,8	—5,0	2,7—3,2
«Ленинский комсомолец»	4,9	1,9	0,3—0,8	—5,0	1,2—1,7
«Дикобраз»	4,3	2,0	0,3—0,8	—5,0	1,6—2,1
Проект лесовоза	5,2	2,5	0,3—0,8	—5,0	3,0—3,5

Таблица 28

Значения коэффициента k

Используемая формула	«Андрейка» $\frac{N}{N_{np}} = 1,36$ $\frac{N_{np}}{L} = 1,08$	«Ленинский комсомолец» $\frac{N}{N_{np}} = 1,36$ $\frac{N_{np}}{L} = 1,37$	«Дикобраз» $\frac{N}{N_{np}} = 1,36$ $\frac{N_{np}}{L} = 1,12$	Проект лесовоза $\frac{N}{N_{np}} = 1,36$ $\frac{N_{np}}{L} = 1,38$
Формула (106)	27,0+2,7=29,7	22,7+1,2=23,9	23,6+1,6=25,2	24,7+2,6=27,3
« (107)	26,5+2,2=28,7	22,3+1,7=24,0	21,6+2,1=23,7	23,7+2,6=26,3
« (109)	27,0+2,0=29,0	22,7+2,0=24,7	23,6+2,0=25,6	24,7+2,0=26,7
Фактические значения	40,5	23,5	24,0	26,7

В качестве пояснения к табл. 28 следует отметить, что при использовании формулы (107) было принято во всех случаях

$$\frac{a}{v} = 0,1.$$

После определения коэффициентов k и k_0 удельная вместимость может быть подсчитана по формуле

$$\mu = \frac{W}{P} = \left(k k_0 - k_0 \frac{L_0}{L} \right) \frac{L B N_{np}}{P},$$

в которой $k_0 \approx 1,0$. В качестве примера ниже приводятся результаты расчета удельной вместимости для двух судов с центральным расположением машинного отделения. В расчете для определения коэффициента k_0 была использована формула (106).

	«Алгебра»	«Линейный вычислитель»
k по расчету	0,797	0,799
k_0 и k_2	0,941	0,941
k_2	1,09	1,00
$\frac{L}{L_0}$ приведенное	0,162	0,168
λ по расчету	1,43	1,56
λ фактическое	1,44	1,52
Погрешность, %	-0,7	+2,6

Формула, использованная для определения удельной вместимости, содержит три коэффициента, численные значения которых определяются приближенным расчетом. Несмотря на это, в рассматриваемых случаях точность расчетов оказалась удовлетворительной.

§ 6. ОБОСНОВАНИЕ ФОРМУЛ, ПРИВЕДЕННЫХ В § 3 БЕЗ ВЫВОДА

Для определения коэффициента k_0 в равенство

$$V_0 = k_0 L \delta H_{np}$$

выбран внутренний объем судна между двойным деком и верхней, называемой верхней палубой, формулой

$$V_0 = V \left[\left(\frac{H}{T} \right)^2 - \left(\frac{k_2}{T} \right)^2 \right],$$

где V — общий водоизмещение судна.
Из последней формулы следует, что

$$k_0 = \frac{W_0}{L \delta (H - k_2)} = \frac{\left(\frac{H}{T} \right)^2 - \left(\frac{k_2}{T} \right)^2}{\frac{H}{T} - \frac{k_2}{T}}.$$

Расположив в последней формуле числитель дроби в ряд Тейлора и ограничившись тремя членами разложения, найдем

$$k_0 = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{H}{T} - \frac{k_2}{T} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{k_2}{T} - 1 \right) \left[\left(\frac{H}{T} - 1 \right)^2 - \left(\frac{k_2}{T} - 1 \right)^2 \right] \right\}.$$

Таким образом, разделив числитель на знаменатель, приходим к формуле

$$k_0 = \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{k_2}{T} - 1 \right) \left(2 - \frac{H_{np}}{T} \right) \right] \lambda,$$

соответствующий предположению, что палуба двойного дека горизонтальна во всей ширине судна. При выходе к теоретической вместимости коэффи-

циент полноты объема W_0 должен быть несколько увеличен. Учитывая это обстоятельство, можно принять

$$k_0 = \left[1,015 - \frac{1}{2} \left(\frac{k_2}{T} - 1 \right) \left(2 - \frac{H_{np}}{T} \right) \right] \lambda,$$

что соответствует формуле (106).

Для определения коэффициента k_2 , входящего в формулу (104), необходимо подсчитать, какая часть кубического объема лежит в пределах седловатости. В качестве отобразки предельной кривой, в соответствии с требованиями определения заднего борта гражданских судов, что седловатость очерчена квадратичной параболой

$$h = a_0 + \frac{x}{\left(\frac{L_{cp}}{2} \right)^2} = a_0 + \alpha x^2,$$

где α — мера седловатости;

x — расстояние от рассматриваемой точки до мыса, измеренное в долях полудлины судна по грузовой наклонной.

Коэффициент α для лесной и корабельной ветвей седловатости равен соответственно

$$a_0 = 4,0;$$

$$a_0 = 2,0.$$

В дальнейшем мы будем оперировать средней седловатостью, приняв

$$k_{cp} = a_{cp} m = 3m.$$

Кроме того, примем, что материал с коэффициентом вытеснения a_0 , служащий основанием объема, лежащего в пределах седловатости, может быть выражен параболой

$$y = \beta (1 - u^2), \quad (110)$$

где

$$u = \frac{x_0}{1 - x_0}. \quad (111)$$

Произведение

$$F = k_0 B L_{cp} (1 - u^2)$$

характеризует закон изменения площади поперечных сечений пространства, расположенного в пределах седловатости.

Объем седловатости выражается формулой

$$w_1 = L_{cp} \int_0^1 F dx = k_{cp} B L_{cp} \int_0^1 u^2 (1 - u^2) du,$$

в соответствии с чем

$$w_1 = k_{cp} B L_{cp} \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{n+3} \right).$$

Зависимости степеней n от значения α по формуле (111), можно написать

$$w_1 = k_{cp} B L_{cp} \frac{a_0}{3(3 - 2a_0)}$$

и, таким образом, (в предельных)

$$L_0 = 100 \frac{w_1}{L \delta H_{np}} = 100 \frac{k_{cp} L_{cp}}{H_{np}} \frac{a_0}{3(3 - 2a_0)}.$$

где в среднем $L_n : L = 1,025 - 1,030$. Полученный результат соответствует формуле (106).

При определении коэффициента Δ_2 , учитывающего влияние погрешности бамсов, будем исходить из предположения, что площадь в пределах одного бамса выражается равенством

$$y = \frac{2}{3} y_0. \quad (112)$$

где y — двойная ордината шпильки по формуле (110);
 y_0 — погрешность бамсов, равная обычно

$$y_0 = 0,05y.$$

После подстановки значений y и y_0 в формулу (112), найдем

$$f = \frac{1,33}{100} \Delta_2 (1 - \alpha^2)^2.$$

Полный объем в пределах погрешности бамсов может быть подсчитан по формуле

$$\alpha_2 = \frac{2 \cdot 1,33}{100} \Delta_2 \frac{L_n}{2} \int_0^1 (1 - \alpha^2)^2 d\alpha,$$

которая после интегрирования дает (в процентах)

$$\alpha_2 = 1,33 \Delta_2 L_n f(\alpha), \quad (113)$$

где

$$f(\alpha) = \frac{2\alpha^3}{2\alpha^3 + 3\alpha + 1}.$$

Численные расчеты показывают, что приближенно

$$f(\alpha) = \frac{2}{3} \alpha^2.$$

Из формулы (113) следует, что

$$\Delta_2 = \frac{\alpha_2}{1,33 L_n} = 1,33 \frac{L_n}{L} \frac{H}{H_{np}} \alpha^2 \frac{2}{3},$$

как это и было принято в предыдущем параграфе.

§ 7. ВМЕСТИМОСТЬ НЕФТЕВОЗОВ И СУХОГРУЗНЫХ СУДОВ С КОРМОВЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ МАШИННОГО ОТДЕЛЕНИЯ

Вместимость сухогрузных судов с кормовым расположением машинного отделения может быть определена по формуле

$$W = \alpha L B H_{np},$$

где L — суммарная длина грузовых трюмов;

α — коэффициент полноты объема W .

По аналогии с § 5 выразим коэффициент α равенством

$$\alpha = \alpha_0 + \Delta'_1 + \Delta'_2 + \Delta'_3 + \Delta'_4,$$

в котором

$$\alpha_0 = \frac{W_0}{18 H_{np}}.$$

Коэффициенты α_0 и Δ'_i отличаются от коэффициентов Δ_0 и Δ_i лишь тем, что они отнесены к объему корпуса в пределах грузовых трюмов.

Для определения коэффициента α_0 можно воспользоваться формулой (107), представив ее в виде

$$\alpha_0 = \Delta_0 \frac{T}{H_{np}} \left[\left(1 - \frac{\alpha'_2}{W_r} \right) + \frac{\alpha'_4}{\Delta_0} \left(\frac{H}{T} - 1 \right) \right], \quad (114)$$

где W_r — объем рассматриваемой части корпуса от двойного дна до грузовой интерлинии;

Δ_0 — коэффициент полноты этого объема;

α'_4 — объем двойного дна в рассматриваемой части судна;

$\alpha'_2 = \frac{\alpha_2}{18}$ — коэффициент полноты площади грузовых трюмов на уровне грузовой интерлинии.

Коэффициент Δ_0 может быть выражен через коэффициент полноты площади строевой по шпангоутам β в пределах грузовых трюмов равенством

$$\Delta_0 = \beta \alpha,$$

где β — коэффициент полноты модели шпангоута. После подстановки значения коэффициента Δ_0 формула (114) принимает вид

$$\alpha_0 = \frac{T}{H_{np}} \left[\left(1 - \frac{\alpha'_2}{W_r} \right) \beta + \alpha'_4 \left(\frac{H}{T} - 1 \right) \right]. \quad (115)$$

Для определения вместимости нефтевозов

$$W = \alpha' L B H$$

можно воспользоваться формулой

$$\alpha'_0 = \alpha'_2 \frac{T}{H} + \alpha'_4 \left(1 - \frac{T}{H} \right), \quad (116)$$

которая получается из формулы (115) после подстановки $H_{np} = H$ и $\alpha'_4 = 0$.

На рис. 28—30 приведены графики для определения коэффициентов α и α_0 , рассчитанные по безразмерным строевым по шпангоутам и грузовым интерлиниям моделей 60-й серии Тонда. Графики позволяют получить эти коэффициенты в зависимости от коэффициента общей полноты Δ , исчисленного по длине судна L между перпендикулярами, при нескольких значениях относительной длины носовой части судна L_n/L . Каждый график построен для определенной относительной длины кормовой части судна L_k/L . Отрезки

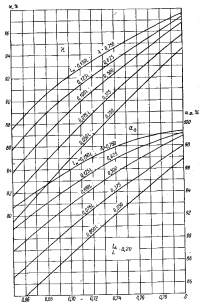


Рис. 28. Кривые u ; $\psi = f(\xi)$ при $I_0/L = 0.50$.

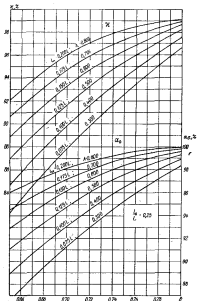


Рис. 29. Кривые u ; $\psi = f(\xi)$ при $I_0/L = 0.35$.

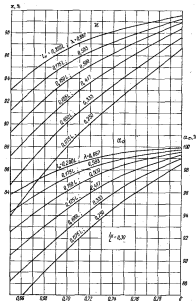


Рис. 30. Кривые x ; $\alpha_0 = f(z)$ при $l_0/L = 0,30$.

длины l_0 и l_k измеряются соответственно от форштея и ахтерштея до грузовых трюмов или грузовых танков. Каждой кривой графиков соответствует определенное отношение

$$\lambda = \frac{l_0}{L}; \quad \frac{l_k}{L} = \frac{l_0}{L}.$$

указанное на кривой. Это отношение, характеризующее условия дифферентации судна, должно выбираться с учетом намеченного положения центра тяжести по длине судна.

Приведенные рисунки показывают, что коэффициенты x и α_0 зависят в основном от коэффициента общей полноты и отношения l_0/L . Отношение l_0/L оказывает значительно меньшее влияние на коэффициенты x и α_0 .

На рис. 31 приведены кривые значений относительной абсциссы центра тяжести x_g и коэффициента продольной полноты носовой половины судна τ_n , соответствующие различным строениям по шпангоутам и грузовым затерлениям. В случае большого расхождения в относительном положении центра тяжести рассматриваемого судна и прототипа целесообразно при определении коэффициентов x и α_0 исходить из приведенного значения коэффициента общей полноты. При этом достаточно учесть лишь влияние на величину общего носовой половины судна. Поэтому в качестве приведенного коэффициента общей полноты можно принять значение этого коэффициента по диаграмме на рис. 31, соответствующее коэффициенту τ_n рассматриваемого судна.

Отношение α_0/W_T в равенстве (115) зависит от относительной высоты двойного дна и коэффициента x_g/x . В среднем для рассматриваемых судов оно оказалось равным

$$\frac{\alpha_0}{W_T} = 0,14.$$

однако вопрос об определении относительного объема двойного дна сухогрузных судов с кормовым расположением машинного отделения требует еще дальнейшего изучения.

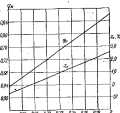


Рис. 31. Соотношения между коэффициентами τ_n , x_g .

Формула для определения поправки Δ'_1 может быть получена из равенства (108) после замены коэффициента α на α_1 . При этом нужно ввести поправочный множитель, учитывающий, что кривая, ограничивающая площадь σ в пределах грузовой трюмы, не имеет параболической формы. Кроме того, нужно принять во внимание, что в настоящем случае седловатость кормовой полубака судна не оказывает существенного влияния на вместимость. Седловатость же у переборки, ограничивающей грузовые отсеки с носа, меньше седловатости на носовой перпендикуляре. Последнее обстоятельство сказывается сильнее на вместимости нефтенавозов, у которых носовая переборка грузовых отсеков расположена дальше от форштевня, чем у сухогрузных судов.

Учитывая отмеченные соображения,¹ представляется возможным принять на основе численных расчетов и сопоставления теоретических и практических цифр для сухогрузных судов (в процентах)

$$\Delta'_1 = 65 \frac{A_{ср}}{N_{ср}} \frac{\alpha_1}{3(3-2\alpha_1)} \frac{A}{A_0}$$

а для нефтенавозов

$$\Delta'_1 = 50 \frac{A_{ср}}{N_{ср}} \frac{\alpha_1}{3(3-2\alpha_1)} \frac{A}{A_0}$$

где $\frac{A_{ср}}{A_0}$ — отношение фактической седловатости к нормальной в характерной точке по длине судна. В качестве таковой удобно принять точку, расположенную на расстоянии $\frac{1}{6}L$ или $\frac{1}{4}L$ от форштевня.

Из аналогичных соображений формула для определения поправки на погнб бимсов после исправления численного коэффициента может быть представлена в виде (в процентах)

$$\Delta'_2 = 0,75 \frac{B}{N_{ср}} \frac{1}{\alpha_2^2}$$

Для судов с нормальными соотношениями можно принять

$$\Delta'_2 = 1,8\%$$

Поправка, учитывающая влияние развала бортов, в среднем равна

$$\Delta'_3 = 0,3\%$$

Вместе, учитывающий телесность набора и (для сухогрузных судов) объем льда, равен приблизительно²

$$\Delta'_4 = -5\% \text{ — для сухогрузных судов;}$$

$$\Delta'_4 = -1,5\% \text{ — для нефтенавозов.}$$

В табл. 29 и 30 приведены значения поправок Δ'_i и коэффициентов α , подсчитанных для нескольких сухогрузных и нефтеналивных

Таблица 29

Значения коэффициентов Δ'_i

Название судов	$\frac{P_{ср}}{A_0}$	Δ'_1	Δ'_2	Δ'_3	Δ'_4	Δ
		%				
Сухогрузные суда						
«Днепропетр»	1,00	3,6	1,8	0,3	-5,0	0,7
Проект лесовоза	1,00	2,9	1,8	0,3	-5,0	—
Нефтенавозы						
«Калба»	1,00	3,2	1,8	0,3	-1,5	3,8
Проект (P=17 600 т)	0,14	0,4	1,8	0,3	-1,5	1,0
«Викона»	0,51	1,6	1,8	0,3	-1,5	2,2

Таблица 30

Определение коэффициента α

Название судна	α_0	β	α	α'	Погрешность
	%				
Сухогрузные суда					
«Днепропетр»	86,5	0,7	87,3	87,0	+0,3
Проект лесовоза	86,5	—	86,6	87,0	-0,6
Нефтешаши					
«Калба»	94,5	3,8	95,4	95,3	+0,1
Проект (P=17 600 т)	94,3	1,9	95,3	94,2	+1,2
«Викона»	95,1	2,2	97,3	97,1	+0,3

судов. В расчетах, относящихся к сухогрузным судам, относительный объем двойного дна был принят равным 14%.

Из табл. 30, в которой наряду со значениями коэффициента α , полученными приближенным расчетом, приведены фактические зна-

¹ Практические множители в формулах для определения Δ'_1 и Δ'_2 учитывают в известной мере и погрешности аналогичного способа определения вместимости.

² При горизонтальном междудонии вместе $\Delta'_4 \approx -3\%$.

чения этого коэффициента α' , следует, что средняя погрешность расчёта по пяти судам равна 0,5%, а максимальная — 1,2%.

Для рассматриваемых в настоящем параграфе судов погрешность в определении удельной вместимости $\gamma = W/P$ равна погрешности, допущенной в определении коэффициентов α и α' .

Если при проектировании нефтевоза предлагаемый способ применяется для определения вместимости судна с помпой отделением, расположенным между грузовыми цистермами, то, строго говоря, под α следует понимать отношение

$$\alpha = \frac{W + w_{\text{м}}}{(l + l_{\text{м}}) BH},$$

где $w_{\text{м}}$ и $l_{\text{м}}$ — объём и длина помпового отделения. Практически, однако, можно отказаться от учёта влияния подобного помпового отделения, что не приводит к существенной погрешности.

Для определения вместимости кормовой топливной цистерны нефтевозов можно воспользоваться формулой

$$w_{\text{м}} = m \beta l_{\text{к}} B H_{\text{к}},$$

где m — численный коэффициент, значения которого приведены в табл. 31;

Таблица 31

Значения коэффициента m

γ	$H/T = 1,2$		$H/T = 1,4$	
	$l'_{\text{к}} = 0,25L$	$l'_{\text{к}} = 0,30L$	$l'_{\text{к}} = 0,25L$	$l'_{\text{к}} = 0,30L$
0,65	0,83	0,91	0,85	0,93
0,70	0,87	0,94	0,89	0,96
0,75	0,90	0,96	0,91	0,97
0,80	0,92	0,97	0,93	0,98

$l_{\text{к}}$ — длина цистерн;

$H_{\text{к}}$ — высота борта в месте расположения цистерн.

Символ $l'_{\text{к}}$ в табл. 31 обозначает расстояние от актеритива до середины цистерн.

§ 6. ВМЕСТИМОСТЬ СУХОГУЗНЫХ СУДОВ

с промежуточным расположением машинного отделения

В рассматриваемом случае для определения вместимости судна нужно предварительно определить объём машинного отделения. Это может быть сделано с помощью графиков, рассмотренных в предыдущем параграфе. Она позволяют (рис. 32) определять вместимость

корпуса W' и W'' на протяжении участков длиной судна $l = l'$ и $l = l''$ в предположении, что $l_{\text{к}} = l'_{\text{к}}$ и $l_{\text{к}} = l'_{\text{к}}$. После этого объём машинного отделения найдётся из равенства

$$W_{\text{м}} = W' - W''.$$

Определив объём $W_{\text{м}}$, нетрудно подсчитать вместимость грузовых трюмов

$$W' = W_{\text{м}} - W_{\text{м}} - k b_{\text{д}} L B H_{\text{тр}} - W_{\text{м}}$$



Рис. 32. Схема к определению вместимости сухогрузных судов с промежуточным расположением машинного отделения.

с помощью формул, приведенных в § 5, и, если необходимо, коэффициент полноты объёма трюмов

$$\alpha' = \frac{W}{l B H_{\text{тр}}}.$$

Погрешность коэффициента α' обуславливается погрешностями, допущенными при определении коэффициентов k , $b_{\text{д}}$, $H_{\text{тр}}$, α .

При определении вместимости сухогрузных судов с промежуточным расположением машинного отделения может оказаться, что $l'_{\text{к}} > 0,3$. В подобных случаях при определении объёма W' приходится прибегнуть к экстраполяции.

§ 9. УВЕЛИЧЕНИЕ ВМЕСТИМОСТИ

Под увеличением вместимости мы будем понимать зависимость, выражающую удельную вместимость γ через элементы судна. Это уравнение может быть получено из соотношения

$$\gamma = \frac{W}{P} = \frac{W}{\gamma_d P},$$

где γ_d — коэффициент утилизации водоизмещения по чистой грузоподъемности.

Для сухогрузных судов с центральным расположением машинного отделения в соответствии с формулой (105)

$$\mu = \frac{1}{\gamma \delta_1} \left(\delta k_x - k_n \frac{l_n}{L} \right) \frac{H_{np}}{T}, \quad (117)$$

а для сухогрузных судов с кормовым расположением машинного отделения

$$\mu = \frac{a}{\gamma \delta_1} \frac{1}{L} \frac{H_{np}}{T}, \quad (118)$$

При проектировании нефтеналивных судов задается не удельная вместимость судна, а удельный вес перевозимого груза $1/\rho$. Несмотря на это, для сохранения единообразия формула мы будем пользоваться и при определении вместимости нефтевозов понятием об удельной погрузочной кубатуре. В соответствии с этим под уравнением вместимости нефтевозов мы будем понимать уравнение

$$\mu = \frac{1}{1 + \gamma \delta_1} \frac{1}{L} \frac{H}{T}, \quad (119)$$

которое отличается от предыдущего уравнения присутствием множителя, учитывающего объем, необходимый на расширение нефтепродуктов. Кроме того, для нефтевозов $H_{np} = H$.

Коэффициент γ зависит от условий плавания. Обычно принимают

$$\gamma = 0,025 - 0,035.$$

Для сухогрузных судов с промежуточным расположением машинного отделения действительно уравнение (118), однако в этом случае коэффициент $a = a'$ зависит от величины, характеризующих вместимость судов как с центральным, так и кормовым расположением механизмов.

Остановимся подробнее на уравнении вместимости нефтевозов.

На рис. 33 показаны две схемы расположения отсеков на нефтеналивных судах. Верхняя схема относится к судну с поперечным делением между грузовыми танками, а нижняя схема — к судну с поперечным делением, примыкающим к машинному отделению. Из рисунка следует, что длина грузовых танков может быть выражена равенством

$$l = L - (1 + \lambda) l_n - l_m,$$

в котором коэффициент

$$\lambda = \frac{l_n}{l_m}$$

определяет условия унифицирования. Для судов с расположением, соответствующим нижней схеме на рис. 33, следует принимать, $l_n = 0$.

Отношение

$$\frac{1}{L} = 1 - \frac{(1 + \lambda) l_n + l_m}{L}$$

называется коэффициентом унификации длины. Воспользовавшись последним равенством, можно представить уравнение вместимости нефтевозов в виде

$$\mu = \frac{1}{1 + \gamma \delta_1} \frac{a}{L} \frac{H}{T} \left[1 - \frac{(1 + \lambda) l_n + l_m}{L} \right].$$

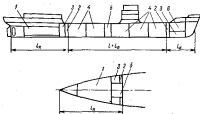


Рис. 33. Схемы наклонного судна.

1 — машинное отделение; 2 — изгородь; 3 — топливный цистерна; 4 — грузовые цистерны; 5 — поперечное деление; 6 — кормовая часть.

Аналогичным образом можно представить и уравнение вместимости применительно к сухогрузным судам с кормовым расположением машинного отделения.

Формулы, приведенные в § 5—8, содержат лишь объемные соотношения и поэтому могут быть использованы только для определения вместимости трюмов после предварительного определения элементов судна. В уравнения же вместимости входит также величина, характеризующие весовые соотношения и условия унифицирования. В соответствии с этим они могут быть использованы в самом процессе определения элементов проектируемого судна, как это показано ниже.

В обоих случаях принята постановка задачи соответствует предположению, что после определения в первых приближениях элементов судна выбрана определенная машинная установка и известна длина машинного отделения. В соответствии с этим при использовании уравнения вместимости можно подсчитать вес механизмов,

и такие расходные веса и определить коэффициент утилизации водоизмещения, входящий в формулы (117), (118), (119). Для этого разделим обе части уравнения веса

$$D(1 - p_k) = P_n + P_r + P_c + P_s + P,$$

где P — чистая грузоподъемность судна, на множитель $P(1 - p_k)$, найдем

$$\frac{D}{P} = \frac{P + P_n + P_r + P_c + P_s}{P(1 - p_k)}.$$

Таким образом,

$$\eta = (1 - p_k) \frac{P}{P + P_n + P_r + P_c + P_s}$$

или в другом виде

$$\eta = \left(1 - g_k \frac{1}{\eta} \frac{H}{T}\right) \frac{P}{P + P_n + P_r + P_c + P_s},$$

где g_k — коэффициент веса корпуса, отнесенный к кубическому водоизмещению.

Рассматривая η как заданную величину, можно решить уравнение вместимости относительно δ или H/T или L , что дает дополнительное условие при определении элементов проектируемого судна.

Если при проектировании котловоза или сухогрузного судна с кормовым расположением машинного отделения в уравнении вместимости задается коэффициент δ , его удобно определять в первом приближении по прототипу. Окончательно же длина L определяется после итерационного расчета удифференцировка так, как это указано в § 4 главы четвертой.

Формулы, приведенные в § 5—8, подтверждают очевидное положение, что вместимость судна увеличивается с возрастанием габаритных размеров судна. Так же влияет увеличение коэффициента δ , поскольку с возрастанием полноты судна увеличиваются коэффициенты k , α , α' .

Ничего обстоит дело с удельной вместимостью. Изменение ширины судна не влияет на нее, поскольку вместимость и водоизмещение и грузоподъемность изменяются пропорционально ширине судна. То же самое можно сказать о влиянии изменения осадки судна при $\frac{H}{T} = \text{idem}$, если $\eta = \text{idem}$. Поэтому ширина судна не входит в уравнение вместимости, а осадка фигурирует лишь в виде отношения H/T .

Отношение $\frac{H}{T} = \frac{H}{T} - \frac{h_2}{T}$ непосредственно входит в уравнение вместимости и в то же время влияет на коэффициент утилизации водоизмещения, фигурирующий в нем. В соответствии с этим изменение отношения H/T резко сказывается на удельной погрузочной

кубатуре. Прибегая к увеличению отношения H/T для увеличения η , не следует упускать из виду, что частично это достигается за счет уменьшения коэффициента утилизации водоизмещения.

Увеличение длины судна или уменьшение длины машинного отделения благоприятно влияет на удельную погрузочную кубатуру. При $L_0/L = \text{idem}$ возрастание длины судна приводит к увеличению вместимости, однако удельная погрузочная кубатура остается в этом случае неизменной.

Увеличение коэффициента δ , которое сопровождается возрастанием η , приводит к уменьшению удельной погрузочной кубатуры. Неблагоприятное влияние увеличения δ может частично компенсироваться возрастанием коэффициентов k , α , α' . Отмеченная закономерность объясняется тем, что при увеличении δ для сохранения водоизмещения, соответствующего заданной грузоподъемности, необходимо уменьшить главные размеры судна.

§ 12. ПАССАЖИРОВМЕЩНОСТЬ

Чтобы получить предварительное представление о размерах судна, соответствующих заданной пассажироместности, удобнее всего сопоставить проектируемое судно с прототипом. С этой целью можно пользоваться различными показателями, например отношением числа перевозимых пассажиров n к водоизмещению судна D или к произведению LB длины судна на ширину, или к длине судна. Как это можно видеть из приведенных ниже таблиц, наиболее стабильным параметром является величина n/L . Несколько менее стабильно отношение n/LB или обратная ему величина. Это показывает, что наиболее существенное значение для размещения пассажиров имеет прежде всего длина судна и в меньшей степени — площадь палуб. Обычные же соотношения мало характерны для пассажирских судов.

В табл. 32 и 33 приведены значения отношений n/L , LB/n и D/n , подсчитанные для ряда советских и иностранных пассажирских судов. Табл. 32 относится к пассажирским судам дальнего плавания, а табл. 33 — к судам местных линий с большим числом пассажиров (сидячих мест).

Для судов одинакового назначения и не слишком отличающихся по размерам наиболее стабильной из сопоставленных коэффициентов n/L дает представление о степени комфортабельности судна.¹ Однако для судов различного назначения этот коэффициент может изменяться в очень широких пределах. В частности, например, как это видно из приведенных цифр, на каждый метр длины судов местных линий приходится примерно в 2,5 раза больше пассажиров, чем на метр длины судов дальнего плавания. С другой стороны, ко-

¹ Для судов с большим числом пассажиров, не имеющих отдельных мест, дополнительно является также коэффициент LB/n .

коэффициент n/L уменьшается по мере перехода от судов чисто пассажирского типа к судам, предназначенным в основном для грузовых операций. На последних коэффициент n/L падает до 0,3—1,0 и становится мало показательным.

Таблица 32

Показатели пассажироемкости судов дальнего плавания

№ п.п.	Число пассажиров, n	Длина по ГВЛ, L_n	Водоизмещение, D	$\frac{D}{n}$	$\frac{L_n B}{n}$	$\frac{n}{L_n}$
1	1972	295,2	68 600	34,8	5,32	6,73
2	2252	218,4	36 220	29,5	4,65	5,77
3	2200	270,7	51 600	23,4	3,82	8,12
4	800	196,1	18 700	21,8	4,35	5,17
5	1574	176,8	26 800	17,0	2,68	8,30
6	1500	190,0	20 870	13,9	3,64	7,30
7	604	127,1	8 530	14,1	3,86	4,75
8	346	110,0	5 980	16,9	3,12	4,97
9	375	82,3	2 725	4,7	1,78	7,00

Таблица 33

Показатели пассажироемкости судов местных линий

№ п.п.	Число пассажиров, n	Длина по ГВЛ, L_n	Водоизмещение, D	$\frac{D}{n}$	$\frac{L_n B}{n}$	$\frac{n}{L_n}$
1	2000	86,0	1950	0,97	0,55	23,8
2	400	26,0	193	0,48	0,45	15,3
3	1000	58,7	470	0,47	0,52	17,0

Для судов дальнего плавания коэффициент n/L возрастает с увеличением длины судна.

Все упомянутые коэффициенты комфортабельности зависят от рейсов, совершаемых судном, поскольку для судов, пересекающих тропические районы, требуется большая площадь открытых палуб, чем для судов, плавающих в Северной Атлантике.

Для более точной ориентировки в вопросе полезно вычертить эскизы расположения отдельных блоков пассажирских помещений, в соответствии с предполагаемым стандартом комфорта. В качестве очень приближенных цифр можно отметить (для судов океанского плавания), что на одного пассажира приходится 13—20 м², а на одного человека из состава команды и обслуживающего персонала 9—12 м² площади закрытых и открытых палуб (не считая служебных помещений: кабузов, буфетных, кладовых и др.). Площади

пассажирских помещений подразделяются приблизительно так (в квадратных метрах):

Каюты	4—7
Салон	2—3
Промысловые палубы	2—5
То же для тропиков	4—8
Рестораны	≈ 1
Коридоры, вестибюли	2—3
Санитарно-бытовые помещения	≈ 1

Во время разработки проекта эскизы и чертежи общего расположения помещений пассажирского судна обычно вычерчиваются в ряде вариантов, которые учитываются при выборе его элементов. Площади помещений, выявившиеся в результате такой проработки, могут значительно отличаться от первоначальных набросков.

**ПРИБЛИЖЕННЫЕ ФОРМУЛЫ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛАВУЧЕСТИ
И НАЧАЛЬНОЙ ОСТОЙЧИВОСТИ.
УРАВНЕНИЕ ОСТОЙЧИВОСТИ**

§ 1. ПРЯМОУГОЛЬНАЯ СТРОЕВАЯ ПО ВАТЕРЛИНИИ

Наиболее простой способ приближенного построения строевой по ватерлинии сводится к замене ее двумя прямыми линиями, как это показано на рис. 34. Несмотря на то, что прямоугольная строевая значительно отличается от строевых по ватерлинии обычных судов, подобное упрощение позволит с достаточной степенью точности решать некоторые задачи, имеющие практическое значение.



Рис. 34. Построение прямоугольной строевой по ватерлинии.

В рассматриваемом случае площадь грузовой ватерлинии S_0 и возмещение V_0 , соответствующие осадке T_0 , следует рассматривать как заданные величины, и, таким образом, конфигурация строевой вполне определяется площадью ватерлинии S_1 и соответствующей осадкой t_1 в точке пересечения прямых, образующих строевую по ватерлинии.

Перемещая точку L параллельно воображаемой прямой AM , можно получить различные конфигурации строевой по ватерлинии, причем эти строевые будут равноценны по площадям. Для получения определенного решения прием в качестве дополнительного условия, что точка L должна лежать на диагонали BC .

Приравняв сумму площадей треугольника AKL и четырехугольника $KLMC$ заданному водоизмещению, найдем

$$2V_0 = S_1(T_0 - t) + (S_0 + S_1)t = S_1T_0 + S_1t. \quad (120)$$

Из подобия треугольников KCL и ACB следует, что

$$S_1T_0 = S_1t. \quad (121)$$

Сопоставляя формулы (120) и (121), найдем

$$V_0 = S_1t,$$

откуда¹

$$t = \frac{V_0}{S_0} T_0. \quad (122)$$

Кроме того, из формул (121) и (122) следует, что

$$S_1 = \frac{2V_0}{T_0} S_0. \quad (123)$$

Каждая из формул (122) и (123) при заданных значениях S_0 и T_0 вполне определяет форму строевой по ватерлинии.

Для вывода приближенной формулы, связывающей ординату центра величины z с коэффициентами λ и α , достаточно составить следующее уравнение моментов (рис. 34) площади AKL , KCM_1L и LMM_1

$$V_0 x_0 = \frac{1}{2} S_1 t_1 \frac{2}{3} t_1 + S_1 t \left(\frac{t}{2} + t_1 \right) + \frac{1}{2} (S_0 - S_1) t \left(\frac{2}{3} t + t_1 \right),$$

которое после соответствующих преобразований приводит к формуле

$$\frac{z_0}{T_0} = 0,833 - 0,333 \frac{\lambda_0}{\alpha_0}. \quad (124)$$

Формула (124) была получена статистическим путем французским инженером Норманом.

§ 2. ПАРАБОЛИЧЕСКАЯ СТРОЕВАЯ ПО ВАТЕРЛИНИИ

Параболические кривые были впервые широко использованы для изображения судовой поверхности Чаппаном.

Подробное исследование параболической строевой по ватерлинии можно найти в работе В. Л. Подпошкина [36]. Рассматривая этот вопрос, В. Л. Подпошкин расположил оси координат таким образом, что вершина параболы совпала с началом координат (рис. 35). Прием в качестве аргумента относительную осадку T/T_0 , где T_0 —

¹ Для упрощения изложения формул в настоящей главе предполагается, что коэффициенты общей полноты и плотности грузовой ватерлинии определяются исходя из данных судна по грузовой ватерлинии. В противном случае

$$\lambda = \frac{I_0}{L} \alpha_0 \approx 1,625 \alpha_0$$

и, следовательно,

$$\frac{\alpha}{\lambda} = \frac{\alpha}{\alpha_0} \frac{1}{1,625} \approx 0,615 \frac{\alpha}{\alpha_0}.$$

осадка, соответствующая начальным условиям, В. Л. Подонин представил уравнение параболы в следующем виде:¹

$$S = S_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^n, \quad (125)$$

удовлетворяющем условиям

$$\text{при } \frac{T}{T_0} = 0, \quad S = 0;$$

$$\text{при } \frac{T}{T_0} = 1, \quad S = S_0.$$

Показатель степени n параболы по катеринным определяется условием

$$\int_0^1 S dT = V_0.$$

Подставив вместо S его значение и изменив пределы интегрирования, найдем

$$V_0 = S_0 T_0 \int_0^1 \left(\frac{T}{T_0} \right)^n d \frac{T}{T_0} = S_0 T_0 \frac{1}{n+1},$$

откуда

$$n = \frac{S_0}{V_0} - 1. \quad (126)$$

Рис. 35. Параболическая стропила по катеринным.

Из приведенных выкладок следует также, что водонепроницаемая судна по произвольную катеринную может быть выражено уравнением

$$V = S_0 T_0 \frac{1}{n+1} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{n+1},$$

которое после подстановки вместо $(n+1)$ его значения перепишется следующим образом:

$$V = V_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{n+1}. \quad (127)$$

Из формул (126) и (127), которые могут быть представлены в виде

$$\left. \begin{aligned} n &= \alpha_0 \frac{L_0}{L} \frac{R_0}{B} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\alpha} \\ \delta &= \zeta_0 \frac{L_0}{L} \frac{R_0}{B} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\alpha} \end{aligned} \right\} \quad (128)$$

¹ Параболическая кривая, построенная по формуле (125), впадает в ось ординат под прямым углом, что отличает ее от обычных стропил по катеринным, не имеющих горизонтальной касательной.

следует, что для параболы по катеринным

$$\frac{\alpha}{\delta} = \frac{\alpha_0}{\zeta_0} = \frac{1}{\chi} = \text{const.}$$

В этом отношении параболы по катеринным отличаются от стропил обычной формы, для которых, как общее правило, $\chi \neq \text{const.}$

Полученные результаты могут быть использованы для вычисления приближенной формулы ординаты центра тяжести. Для этого составим уравнение момента

$$V_{\sigma} = \int_0^1 S T dT = S_0 T_0^{\frac{1}{2}} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{n+1}{2}} d \frac{T}{T_0} = \frac{S_0 T_0^{\frac{1}{2}}}{n+2},$$

которое после подстановки вместо n его значения приводит к формуле

$$\frac{\sigma}{T_0} = \frac{1}{1 + \frac{\alpha_0}{\zeta_0}}, \quad (129)$$

выведенной Л. Эйлером. Эта формула дает результаты, соответствующие нижнему пределу стремящихся на практике соотношений.

В заключение уместно отметить, что вместо формул (125) и (127), содержащих дробные показатели степени, во многих случаях можно пользоваться разложениями их в ряды. Ограничившись первыми тремя членами разложения, найдем

$$\begin{aligned} S &= S_0 \left[1 + \left(\frac{\alpha_0}{\zeta_0} - 1 \right) \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_0}{\zeta_0} - 1 \right) \left(\frac{\alpha_0}{\zeta_0} - 2 \right) \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right)^2 \right]; \end{aligned} \quad (130)$$

$$V = V_0 \left[1 + \frac{\alpha_0}{\zeta_0} \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right) + \frac{1}{2} \frac{\alpha_0}{\zeta_0} \left(\frac{\alpha_0}{\zeta_0} - 1 \right) \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right)^2 \right]. \quad (131)$$

Остатки в формуле (130) лишь два члена ряда, причем к выражению

$$S = S_0 \left[1 + \left(\frac{\alpha}{\zeta} - 1 \right) \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right) \right].$$

Формула (131), если сохранить лишь два члена разложения, приводит к уравнению

$$V = V_0 \left[1 + \frac{\alpha}{\zeta} \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right) \right]. \quad (132)$$

которое при $T > T_0$ дает точное решение для судов с прямыми обводами грузовой ватерлинии. Формула (132) может быть непосредственно получена из равенства

$$V = V_0 + S_0(T - T_0),$$

в котором $S_0(T - T_0)$ выражает объем корпуса между двумя ватерлиниями, соответствующими осадкам T и T_0 .

§ 3. СОПОСТАВЛЕНИЕ ФОРМУЛ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРДИНАТЫ ЦЕНТРА ВЕЩИНЫ

Наряду с формулами²

1) Нормана

$$\frac{z}{T} = 0,833 - 0,333 \frac{b}{a};$$

2) Л. Эйлера

$$\frac{z}{T} = \frac{1}{1 + \frac{b}{a}},$$

которые были получены в предыдущем параграфе, отметим следующие аналитические формулы:

3) А. П. Фан-дер-Флинта

$$\frac{z}{T} = 1 - \frac{1}{2} \frac{1}{2 - \frac{b}{a}},$$

основанную на параболической строеной с вершиной у грузовой ватерлинии;

4) Л. М. Ногиды

$$\frac{z}{T} = \frac{2}{3} - \frac{1}{6} \frac{2 - \frac{b}{a}}{2 - \frac{b}{a}}.$$

полученную путем рассогласования дуги параболической строеной;

5) Л. М. Ногиды

$$\frac{z}{T} = \frac{k}{1 + \frac{b}{a}} + (1 - k) \left(1 - \frac{1}{2} \frac{1}{2 - \frac{b}{a}} \right).$$

² На диаграммах, приведенных в настоящем параграфе, сопоставленные формулы являются под приведенными ниже порядковыми номерами.

соответствующую комбинарованную строеной по ватерлинии. Коэффициент k в последней формуле может изменяться в пределах от нуля до единицы, однако обычно подходящие результаты получаются, если $k = 0,5-0,8$. При $k = 0,5$ кривые, построенные по комбинарованной формуле и формуле Нормана, практически совпадают.

Вывод трех последних зависимостей можно найти в курсе [23], где вопрос о приближенных формулах элементов плавучести и остойчивости рассмотрен более детально.

Приведем также следующие статистические формулы:

6) В. В. Ашника

$$\frac{z}{T} = 0,858 - 0,370 \frac{b}{a};$$

7) В. Г. Власова

$$\frac{z}{T} = 0,372 + 0,168 \frac{a}{b};$$

8) Л. М. Ногиды

$$\frac{z}{T} = \frac{1}{2} \left(\frac{a}{b} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

Формула В. В. Ашника является модификацией формулы Нормана, а формула В. Г. Власова — удлинением его же формулы, полученной по способу интегрального интерполирования. Одночленная формула Л. М. Ногиды, удобная вследствие своей простоты при анализе многих задач, возникающих в процессе проектирования судов, дает достаточно точные результаты при значениях коэффициента χ , превышающих 0,65.*

Сопоставляя приведенные формулы, нужно иметь в виду, что простейшие соотношения подобного типа не могут охватить все многообразие встречающихся на практике форм теоретического чертежа. В соответствии с этим лучше из них дают хорошие результаты для судов определенных типов при определенной форме обводов или же соответствуют средним значениям встречающихся на практике случаев.

На рис. 36 сопоставлены кривые 1—4, построенные по формулам, соответствующим схематизированным строеном по ватерлинии, а также кривая 7, построенная по формуле В. Г. Власова. Первые четыре формулы, как равным образом и формула 5), соответствующая комбинарованной строеной по ватерлинии, дают точные ре-

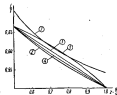


Рис. 36. Сопоставление формул для определения ординаты центра тяжести.

* Меньшие коэффициенты χ применяются лишь для некоторых типов мелких судов с очень малыми значениями коэффициента обшей полноты.

результаты при применении их к упрощенным моделям судов с треугольными и прямоугольными поперечными сечениями. Этим двумя типами упрощенных обводов соответствуют следующие соотношения:

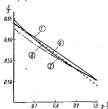


Рис. 37. Соотношение формул для определения площади центра поперечника.

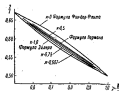


Рис. 38. Значения z/T по комбинированной формуле в зависимости от коэффициента k .

результаты. Вместе с тем она приводит к несколько более низкому расчетному положению метацентра над килем, что снижает вероятность занесения в расчеты устойчивости ошибки в опасную сторону.

На рис. 37 кривые 1 и 2, построенные по формулам Нормана и Л. Эйлера, сопоставлены с кривыми 6 и 8, построенными по формуле В. В. Ашана и по предлагаемой формуле 8). Рассмотрение этого графика приводит к выводу, что формула В. В. Ашана может быть использована в интервале значений коэффициента вер-

$$\frac{z}{T} = \frac{2}{3} \text{ при } \chi = 0,5;$$

$$\frac{z}{T} = \frac{1}{2} \text{ при } \chi = 1,0.$$

Для судов обычной формы с промежуточными значениями χ кривая 2 соответствует приблизительно нижнему пределу встречающихся на практике соотношений и дает хорошие результаты для судов с ярко выраженной U-образной формой шпангоута. Кривая 3, соответствующая утравованным V-образным шпангоутам, приводит, как правило, к завышенным результатам. К еще более завышенным результатам приводит кривая 7, построенная по формуле В. Г. Власова.

Формула Нормана (кривая 1) соответствует приблизительно средним практическим цифрам. Часто, однако, формула, соответствующая двучленному уравнению параболической створки по Астерлингу (кривая 4), дает более близкие к действительности результаты.

кальной полноты, лежащих в пределах $\chi = 0,6-0,9$. Для больших значений коэффициента χ формула В. В. Ашана приводит, по-видимому, к заниженным результатам. Формула 8), как отмечалось, дает обычно хорошие результаты при $\chi = 0,65-1,0$.

Выше указывалось, что формулы Эйлера и Фан-дер-Фланта были выведены для судов с двумя типами параболических створок по втерлиниям и соответствуют приблизительно нижнему и верхнему пределам соотношений, которые могут встретиться на практике. В зависимости от типа судна и характера его обводов практические цифры могут приближаться к одному или другому пределу. Пользуясь комбинированной формулой 5), которая приводит к значениям z/T , расположенным между значениями этого отношения, соответствующими формулам Эйлера и Фан-дер-Фланта, можно подобрать наиболее подходящую формулу для отдельных типов судов.

На рис. 38 приведены кривые значений z/T , вычисленные для $k = 0,75$; $k = 0,667$ и $k = 0,5$. Там же нанесены и кривые граничных значений z/T для $k = 1,0$ и $k = 0$, совпадающие с рассмотренными ранее кривыми 2 и 3, а также кривая, построенная по формуле Нормана.

§ 4. ПАРАБОЛИЧЕСКИЕ СТОВЕРЫ ПО ШПАНГОУТАМ И ВАТЕРЛИНИИ

В системе координат с началом на наиболее полном шпангоуте уравнение носовой или кормовой ветви параболической створки по шпангоутам выразится следующим образом:

$$\Omega = \Omega_0 (1 - u^2), \quad (133)$$

где Ω_0 — площадь носового шпангоута.

Ограничимся рассмотрением случая, когда наиболее полный шпангоут расположен на середине длины судна, в соответствии с чем

$$u = \frac{x}{L}.$$

Уравнение (133) удовлетворяет условиям

$$\text{при } x = 0 \quad \Omega = \Omega_0;$$

$$\text{при } x = \frac{L}{2} \quad \Omega = 0.$$

Показатель степени n_0 в этом уравнении определяется условием

$$V_1 = \frac{L}{2} \int_0^1 \Omega du = \frac{L}{2} \Omega_0 \int_0^1 (1 - u^2) du,$$

где под $V_1 = \frac{1}{2} \delta_1 L B T$ следует понимать водоизмещение V_n и V_k носовой или кормовой половины судна.

Проведя интегрирование, найдем

$$V_1 = \frac{L}{2} Q_n \left(1 - \frac{1}{n_1 + 1} \right),$$

откуда

$$1 - \frac{1}{n_1 + 1} = \frac{\delta_1}{\beta}$$

и, таким образом,

$$n_1 = \frac{\delta_1}{\beta - \delta_1} = \frac{\gamma_n}{1 - \gamma_n}. \quad (134)$$

Воспользуемся уравнением (133) для определения абсциссы центра величины, для чего составим следующее выражение момента площади носовой или кормовой половины стрелой по шпангоутам относительно центра:

$$M = V_1(x_c)_1 = Q_n \frac{L^3}{4} \int_0^1 (1 - a^n) u du.$$

Проведя интегрирование, найдем

$$V_1(x_c)_1 = Q_n \frac{L^3}{4} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{n_1 + 2} \right) = Q_n \frac{L^3}{4} \frac{\gamma_n}{2(2 - \gamma_n)}.$$

Таким образом, для носовой или кормовой половины судна

$$(x_c)_1 = \frac{L}{4} \frac{1}{2 - \gamma_n}.$$

Из последней формулы можно получить выражение для абсциссы центра величины всего судна

$$x_c = \frac{M_n - M_k}{V} = \frac{Q_n}{V} \frac{L^3}{8} \left(\frac{\gamma_n}{2 - \gamma_n} - \frac{\gamma_k}{2 - \gamma_k} \right), \quad (135)$$

которое после простых преобразований дает

$$x_c = \frac{1}{V} \frac{L}{4} \frac{\gamma_n - \gamma_k}{(2 - \gamma_n)(2 - \gamma_k)}. \quad (136)$$

Поскольку

$$\varphi = \frac{1}{2} (\gamma_n + \gamma_k),$$

формула (136) может быть представлена также следующим образом:

$$\frac{x_c}{L} = \frac{1}{2} \frac{\gamma_n - \gamma_k}{(\gamma_n + \gamma_k)(2 - \gamma_n)(2 - \gamma_k)}. \quad (137)$$

Путем численных подсчетов нетрудно убедиться, что для значений γ_n и γ_k , не выходящих из обычных пределов, знаменатель дроби в формуле (137) изменяется в пределах от 4,2 до 4,7. Округленная формула

$$\frac{x_c}{L} = 0,225 (\gamma_n - \gamma_k) = 0,225 \Delta \quad (138)$$

приводит к достаточно точным для предварительных расчетов результатам.

Формулой (138) можно пользоваться при построении теоретического чертежа, когда по заданным φ и x_c требуется определить [30]

$$\Delta = 4,45 \frac{x_c}{L};$$

$$\gamma_n = \varphi + \frac{1}{2} \Delta;$$

$$\gamma_k = \varphi - \frac{1}{2} \Delta.$$

Формула (138) сохраняет достаточную точность и в тех случаях, когда наиболее полное поперечное сечение судна не совпадает с модель-теплогоутом, а также для судов с цилиндрической истинкой.

По аналогии с уравнением стрелой по шпангоутам можно составить уравнение носовой и кормовой частей ватерлинии:

$$y = \frac{B}{2} (1 - u^n), \quad (139)$$

где

$$u = \left(\frac{y}{\frac{B}{2}} \right);$$

$$n_1 = \frac{\gamma_n}{1 - \gamma_n}.$$

Подобным же образом на основе формулы (137), заменяя буквенные обозначения, приходим к следующему выражению, служащему для определения абсциссы центра тяжести ватерлинии:

$$\frac{x_b}{L} = \frac{1}{2} \frac{\gamma_n - \gamma_k}{(\gamma_n + \gamma_k)(2 - \gamma_n)(2 - \gamma_k)}. \quad (140)$$

Наконец, формула (140) может быть модифицирована в виде

$$\frac{x_b}{L} = 0,225 (\gamma_n - \gamma_k).$$

§ 3. ПОПЕРЕЧНЫЙ МЕТАЦЕНТРИЧЕСКИЙ РАДИУС

Момент инерции носовой или кормовой части ватерлинии относительно продольной оси равен

$$I_x = \frac{2}{3} \int_0^{L_1} y^2 dx,$$

где L_1 — длина носовой или кормовой части ватерлинии.

Для судна с параболической ватерлинией это равенство на основании формулы (133) переписывается следующим образом:

$$I_x = \frac{1}{12} L_1 B^3 \int_0^1 (1 - \alpha^2)^3 d\alpha, \quad (141)$$

где

$$\alpha = \frac{x}{L_1}; \quad n_1 = \frac{a_1}{1 - a_1}.$$

В последней формуле под a_1 понимается коэффициент полноты носовой или кормовой части ватерлинии.

Из формулы (141) следует, что

$$I_x = \frac{1}{12} L_1 B^3 \int_0^1 (1 - 3\alpha^2 + 3\alpha^4 - \alpha^6) d\alpha = \\ = \frac{1}{12} L_1 B^3 \left(1 - \frac{3}{n_1 + 1} + \frac{3}{2n_1 + 1} - \frac{1}{3n_1 + 1} \right).$$

Зная n_1 его значением, нетрудно найти после соответствующих преобразований

$$I_x = \frac{L_1 B^3}{2} \frac{a_1^2}{(1 + a_1)(1 + 2a_1)}. \quad (142)$$

Представим формулу (142) в виде

$$I_x = \frac{1}{k} L_1 B^3 \lambda_1^2, \quad (143)$$

где

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{2} \frac{a_1}{(1 + a_1)(1 + 2a_1)}.$$

Подсчеты показывают, что для значений a_1 , представляющих практический интерес, численные значения множителя k изменяются в очень узких пределах от $k \approx 11,65$ до $k \approx 11,75$.

В среднем можно принять

$$k \approx 11,7.$$

А. П. Фан-дер-Флит, которому принадлежит приведенный выше вывод, предложил для определения полного момента инерции ва-

терлинии исходить из осредненных значений коэффициента полноты носовой и кормовой частей ватерлинии, пользуясь формулой

$$I_x = \frac{1}{k} L B^3 \lambda^2, \quad (144)$$

где λ — общий коэффициент полноты ватерлинии.

Этой формуле соответствует следующая формула для определения поперечного метациентрического радиуса:

$$\rho = \frac{I_x}{V} = \frac{1}{k} \frac{\lambda^2}{\delta} \frac{B^2}{T}. \quad (145)$$

Сопоставив действительные значения моментов инерции ватерлиний обычной судовой формы с результатами, подсчитанными по формуле (144), А. П. Фан-дер-Флит принял коэффициент k равным

$$k \approx 11,4.$$

При более подробном рассмотрении вопроса [28] оказывается, что для действительных судов коэффициент k зависит не столько от полноты, сколько от формы грузовой ватерлинии. В частности, при $\lambda = \text{const}$ он убывает с увеличением длины цилиндрической вставки и для кормовой полноты судна больше, чем для носовой. В среднем коэффициент k изменяется в следующих пределах:

Для судов с эллиптической кормой	11,3—11,4
» » крейсерской	11,4—11,6
Для эллиптической носы	11,3—11,9
Для трапециев с крейсерской кормой	11,8—12,2
» для малых промысловых судов и буксиров	12,1—12,4

Применяя формулу А. П. Фан-дер-Флита, нетрудно точно учесть влияние цилиндрической вставки на I_x и ρ . Для этого можно воспользоваться формулой [28]

$$\frac{1}{k_0} = \frac{1}{k} \left(\frac{I_{x_0}}{I_x} + \frac{1}{k} \frac{(a - a_0)^2}{1 - a_0} \right),$$

позволяющей вычислить новый коэффициент $\frac{1}{k_0}$ в формуле А. П. Фан-дер-Флита в зависимости от коэффициента полноты ватерлинии, длины цилиндрической вставки и коэффициента $\frac{1}{k}$ в формулах (144) и (145). Пусть $k \approx 11,7$. Тогда при изменении длины цилиндрической вставки в пределах $I_{x_0} = 0—1,0$ и коэффициента полноты ватерлинии в пределах $a = 0,72—1,0$ k_0 принимает следующие значения:

I_{x_0}	0	0,2	0,4	0,6	1,0
a	0,720	0,775	0,825	0,880	1,0
k_0	11,70	11,50	11,35	11,55	12,9

Таким образом, в рассматриваемом случае коэффициент k_0 оказался сравнительно стабильным. Он меняется в больших пределах,

если вариации длины цилиндрической вставки производятся при $\alpha = \text{const}$.

В заключение рассмотрим некоторые статистические формулы, предложенные для определения поперечного метадентрического радиуса. Все они имеют вид

$$r = f(\alpha, \delta, B, T).$$

Для удобства сравнения представим их как

$$\frac{1}{k} = \frac{r}{\alpha^2 \frac{B}{T}},$$

где k — практический коэффициент, аналогичный коэффициенту в формуле А. П. Фан-дер-Флита.

Формула В. В. Ашана, полученная путем статистического обследования ряда судов с коэффициентами полноты грузовой ватерлинии, изменяющимися в пределах от $\alpha = 0,64$ до $\alpha = 0,77$, дает

$$\frac{1}{k} = \frac{0,11}{\alpha} - \frac{0,035}{\alpha^2}$$

Формула В. Г. Власова приводится к виду

$$\frac{1}{k} = \frac{0,0602}{\alpha} - \frac{0,02}{\alpha^2}$$

Формула Ховгарда, предложенная для военных кораблей, может быть переписана следующим образом:

$$\frac{1}{k} = \frac{0,0096}{\alpha} + 0,0727,$$

а формула Нормана представляется в виде

$$\frac{1}{k} = \frac{0,068}{\alpha^2} + 0,0745,$$

Приводим также две формулы И. А. Яковлева

$$\frac{1}{k} = \frac{0,1}{\alpha} - \frac{0,0283}{\alpha^2} \quad \text{при } \alpha < 0,68;$$

$$\frac{1}{k} = \frac{1+\alpha^2}{24\alpha} \quad \text{при } \alpha \geq 0,68.$$

С помощью приведенных данных можно получить следующие цифры, дающие представление о пределах применимости отдельных формул:

Коэффициент k по формулам

Коэффициент k по формулам	При значениях коэффициента α		
	0,65	0,75	0,85
А. П. Фан-дер-Флита	11,40	11,40	11,40
Фан-дер-Флита с коэффициентами			
В. В. Ашана	11,65	11,65	—
В. В. Ашана	11,60	11,65	—
В. Г. Власова	10,90	11,70	12,75
Ховгард	11,20	11,90	11,70
Норман	10,70	11,25	11,70
И. А. Яковлева	11,50	11,55	11,85

Приведенные цифры показывают, что некоторые из предложенных формул могут применяться лишь в узком интервале значений коэффициента полноты ватерлиний. Поскольку же полнота ватерлиний сама по себе мало скажется на величине рассматриваемого коэффициента, нет основания усложнять формулу А. П. Фан-дер-Флита, которая дает хорошие результаты при подходящих значениях коэффициента k .

§ 4. ПРОДОЛЬНЫЙ МЕТАЦЕНТРИЧЕСКИЙ РАДИУС

Если длина носовой или кормовой метки ватерлинии равна L_1 , то соответствующий ей момент инерции относительно поперечной оси, проходящей через начало координат, равен

$$I_y = 2 \int_0^{L_1} x^2 y dx.$$

Пусть рассматриваемая метка ватерлинии очерчена параболической кривой

$$y = \frac{B}{2} (1 - u^2),$$

где

$$u = \frac{x_1}{L_1}; \quad u_1 = \frac{x_1}{1 - u_1},$$

и, следовательно,

$$I_y = BL_1^3 \int_0^1 u^2 (1 - u^2) du.$$

После интегрирования и подстановки пределов найдем

$$I_y = BL_1^3 \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{5} \right).$$

Заменив показатель степени n_1 его значением, приходим к формуле

$$I_y = \frac{BL_1^3}{3} \frac{n_1}{3 - 2n_1}.$$

Таким образом, полный момент инерции затерпавши относительно поперечной оси, проходящей через начало координат, равен

$$I_y = \frac{BL^3}{3} \left(\rho_a \frac{a_n}{3-2a_n} + \rho_b \frac{a_n}{3-2a_n} \right),$$

где, как и раньше,

$$l_a = \frac{L_a}{L}; \quad l_b = \frac{L_b}{L}.$$

Ограничимся рассмотрением случая, когда $l_a = l_b = 0,5$, и, следуя А. П. Фан-дер-Флиуту, ищем осредненные значения коэффициентов α . При этих условиях мы приходим к следующим приближенным формулам, которые могут быть использованы для определения продольного момента инерции затерпавши I_x и продольного метacentрического радиуса R :

$$I_x = \frac{1}{k_1} BL^3 \alpha^2; \quad (146)$$

$$R = \frac{1}{k_2} \frac{\alpha^2 L^3}{T}; \quad (147)$$

где

$$k = 12\alpha(3-2\alpha).$$

Численные подсчеты показывают, что для параболических затерпавши коэффициент k_1 очень стабилен и лежит в пределах от $k_1 \approx 13,0$ до $k_1 = 13,4$ при изменении α от 0,6 до 0,8. Сопоставляя точные значения моментов инерции затерпавши обычной судовой формы с результатами подсчета по формуле (146), А. П. Фан-дер-Флиут принял

$$k_1 = 14,0.$$

В. В. Ашик оценил значение коэффициента k_2 в формуле А. П. Фан-дер-Флиута цифрой

$$k_2 = 13,3.$$

Все другие формулы, предложенные для определения продольного метacentрического радиуса, могут быть приведены к виду

$$k_2 = f(\alpha).$$

Отметим формулу В. В. Ашика

$$\frac{1}{k_2} = \frac{0,11}{\alpha} - \frac{0,04}{\alpha^2};$$

формулу В. Г. Власова

$$\frac{1}{k_2} = \frac{0,107}{\alpha} - \frac{0,0378}{\alpha^2};$$

формулу Ховгарда, относящуюся к косым кораблям,

$$\frac{1}{k_2} = \frac{0,091}{\alpha} - \frac{0,013}{\alpha^2},$$

а также формулу Нормана

$$\frac{1}{k_2} = \frac{0,006}{\alpha^2} + 0,077\alpha.$$

В некоторых расчетах используется соотношение

$$\frac{R}{T} = \frac{k}{k_2} \frac{L^3}{B^3}. \quad (148)$$

Множитель k/k_2 , как это следует из приведенных формул, изменяется в пределах от 0,82 до 0,88.

5.7. УРАВНЕНИЕ ОСТОЙЧИВОСТИ В АЛГЕБРАИЧЕСКОЙ ФОРМЕ

В теории проектирования судов уравнением остойчивости называют выражение

$$h = z + \rho - Z_g,$$

связывающее начальную метacentрическую высоту h с ординатой центра величины z , метacentрическим радиусом ρ и расстоянием центра тяжести корабля от килля Z_g . Как это вытекает из предыдущего параграфа, z и ρ могут быть представлены в виде функциональных зависимостей

$$z = \varphi_1\left(\frac{\delta}{\alpha}\right)T;$$

$$\rho = \varphi_2\left(\frac{\delta}{\alpha}, \alpha\right)\frac{B^3}{T}.$$

Возмущение же центра тяжести Z_g обычно выражают в терминах приближений и долей высоты борта, полагая

$$Z_g = \xi H,$$

и оценивают численное значение коэффициента ξ на основе имеющихся статистических данных или данных по прототипу.

Пользуясь этими зависимостями, можно представить уравнение остойчивости как

$$h = \varphi_1 T + \varphi_2 \frac{B^3}{T} - \xi H, \quad (149)$$

где, как и раньше, под φ_1 и φ_2 понимаются функции от δ и α .

Уравнение (149) может быть переписано в относительных единицах следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\lambda}{B} &= \tau_1 \frac{T}{B} + \tau_2 \frac{B}{T} - \xi \frac{H}{T} \frac{T}{B}; \\ \frac{6}{T} &= \tau_1 + \tau_2 \frac{B^2}{T^2} - \xi \frac{H}{T}. \end{aligned} \right\} \quad (150)$$

Если водоизмещение судна было уже определено в первом приближении, то абсолютное значение метacentрической высоты как функции от безразмерных соотношений его элементов может быть легко найдено при помощи одной из формул (150) и уравнений плавучести, приведенных к виду

$$\left. \begin{aligned} B &= D^{\frac{1}{3}} \left[\frac{1}{\tau_1} \left(\frac{L}{B} \right)^{-1} \left(\frac{B}{T} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{\frac{1}{2}}; \\ T &= D^{\frac{1}{3}} \left[\frac{1}{\tau_2} \left(\frac{L}{B} \right)^{-1} \left(\frac{B}{T} \right)^{-\frac{2}{3}} \right]^{\frac{1}{2}}. \end{aligned} \right\} \quad (151)$$

Из уравнений (150) и (151) следует, что при заданном водоизмещении абсолютная и относительная метacentрическая высоты в основном зависят от отношений ширины судна и высоты борта к осадке, а также от численных значений функций τ_1 и τ_2 . Что же касается отношения длины судна к ширине, то оно не скажется на относительной метacentрической высоте. Абсолютная же метacentрическая высота, если это отношение лежит в пределах, имеющих практическое значение при проектировании судна данного типа, изменится незначительно. Поэтому практически при анализе вопросов, связанных с начальной остойчивостью судна, влиянием отношения длины судна к ширине можно в первом приближении пренебречь.

Это положение может быть пояснено следующими цифрами. Обычно при рассмотрении вопроса о влиянии элементов судна на его качества приходится иметь дело с отклонениями соотношений главных размеров от их средних значений, не превышающих $\pm 10\%$. Если $D = \text{idem}$, $\frac{B}{T} = \text{idem}$ и $\xi = \text{idem}$, то при изменении отношения $\frac{L}{B}$ на $\pm 10\%$ ширина судна в соответствии с формулами (151) изменится на $\pm 3\%$.

Если, кроме того, $\tau_1 = \text{idem}$, $\tau_2 = \text{idem}$ и $\frac{H}{T} = \text{idem}$, то, как это следует из формул (150), метacentрическая высота также изменится на $\pm 3\%$.

Отношение $\frac{H}{T}$ в уравнениях (150) определяется в основном требованиями, предъявляемыми к надводному борту, вместимости и непотопляемости судна. Выбор коэффициента ξ , который входит в функции τ_1 и τ_2 , обуславливается в первую очередь соображениями, связанными в той или другой форме с сопротивлением воды движению судна и с весовыми соотношениями. В известной мере при выборе коэффициента ξ приходится учитывать и вопросы остойчивости. При выборе коэффициента ξ исходят из соображений ходкости, остойчивости и поведения судна на волновом море.

Если численные значения $\frac{H}{T}$, ξ и κ выразим, то для определения отношения $\frac{B}{T}$ по формулам (150) необходимо задаться относительной метacentрической высотой в виде $\frac{h}{B}$ или $\frac{h}{T}$. Целесообразнее пользоваться первым соотношением, учитывая влияние этого параметра на качку судна и другие его показатели. Лишь в тех случаях, когда осадка судна рассматривается как заданная величина, иногда удобнее оперировать отношением $\frac{h}{T}$.

Если отношения $\frac{h}{B}$ или $\frac{h}{T}$ выбраны в первом приближении, то отношение $\frac{B}{T}$ определяется формулами

$$\left. \begin{aligned} \frac{B^3}{T^3} &= \frac{1}{\tau_1} \frac{h}{B} - \frac{\tau_2}{\tau_1} + \xi \frac{H}{T}; \\ \frac{B^2}{T^2} &= \frac{1}{\tau_2} \frac{h}{B} \frac{B}{T} - \frac{\tau_1}{\tau_2} + \xi \frac{H}{T}. \end{aligned} \right\} \quad (152)$$

вытекающими из формул (150).

§ 3. РАЗЛИЧНЫЕ СПОСОБЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УРАВНЕНИЯ ОСТОЙЧИВОСТИ

В начальных стадиях разработки проекта можно использовать уравнение остойчивости в нескольких вариантах.

Вариант I. Предполагается, что водоизмещение предварительно определено с помощью уравнения веса. После этого задаются численные значения коэффициентов ξ , κ и отношений $\frac{L}{B}$

(или $\frac{h}{B}$, $\frac{B}{T}$ и $\frac{H}{T}$). Затем определяются главные размеры судна и его начальная метacentрическая высота. После предварительной оценки остойчивости судна найденные главные размеры и коэффициенты теоретического чертежа, если это будет признано необходимым, корректируются, для чего может быть использовано

уравнение остойчивости в дифференциальной форме, приведенное в § 9 и 10.

На втором этапе решения задачи остойчивость судна исследуется более детально, в соответствии с приведенными выше указаниями, и в случае необходимости элементы судна вновь исправляются.

Вариант 2. Решение той же задачи по второму варианту отличается лишь тем, что отношение $\frac{B}{T}$ не задается, а определяется из уравнения остойчивости. В соответствии с этим при определении элементов судна необходимо задать отношение $\frac{B}{T}$.

Вариант 3. Сопоставляется ряд комбинаций элементов судна, полученных из уравнения весов при различных значениях $\frac{B}{T}$. Если численные значения коэффициентов β и α не установлены по другим соображениям, может оказаться целесообразным рассмотреть несколько комбинаций элементов судна, отличающихся значениями этих коэффициентов.

Для каждой комбинации элементов определяется начальная метацентрическая высота, после чего выделяются комбинации, наиболее полно удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к судну.

Вариант 4. Задача сводится к совместному решению уравнения весов

$$F_1(\beta, L, B, T, H, \dots) + P = 0$$

и уравнения остойчивости

$$F_2(\beta, \alpha, h, B, T, H) = 0.$$

Начальная метацентрическая высота $h = \text{const}$ рассматривается как заданная величина. Как и в предыдущем случае, необходимо дополнительно задаться численными значениями β , α , $\frac{L}{B}$, $\frac{H}{T}$.

Этот способ решения задачи наиболее производлив.

Вариант 5. Исследование модифицированных уравнений остойчивости. Во многих случаях практика целесообразно пользоваться не уравнениями (149) и (150), а преобразованными уравнениями остойчивости, в которые вместо метацентрической высоты вводится другие показатели мореходных качеств судна.

Приведем следующее примерное.

Допустим, что при определении элементов проектируемого судна было принято решение ограничить период свободных поперечных колебаний судна, который можно выразить приближенной формулой

$$T_0 = k \frac{B}{V^{0.5}},$$

где k — практический коэффициент. В этом случае целесообразно с помощью равенства

$$k = \left(k \frac{B}{T} \right)^2;$$

$$\frac{h}{B} = k^2 \frac{B}{T^2}$$

исключить из уравнения остойчивости абсолютную или относительную метацентрическую высоту и ввести вместо нее период свободных поперечных колебаний. Кроме того, вместо ширины судна можно ввести соотношения его элементов с помощью первой из формул (151).

Заменяя в уравнении остойчивости период T_0 его численным значением, получим соотношение, ограничивающее верхний предел начальной остойчивости судна.

Рассмотрим теперь случаи преобразования уравнения остойчивости исходя из условий, ограничивающих нижний предел начальной остойчивости.

При проектировании малых пассажирских судов местного сообщения уже в начальных стадиях проектирования необходимо проверить их остойчивость при скоплении пассажиров на одном борту.

Если p — вес пассажиров, l — среднее расстояние, на котором они расположены от диаметральной плоскости, то при заданном предельном угле крена θ минимально необходимое значение относительной начальной метацентрической высоты найдется из равенства

$$\frac{h}{B} = \frac{p}{D} \frac{l}{B} \frac{1}{\theta}.$$

Обычно величиной p/D можно в первом приближении задаться исходя из данных по подходящим прототипам. Что же касается отношения l/B , то в зависимости от населенности судна можно принять в первом приближении

$$\frac{l}{B} = 0,3 - 0,4.$$

Следует помнить, что получаемое таким путем значение начальной метацентрической высоты должно соответствовать расположению пассажиров на верхних палубах, оговоренному в нормах остойчивости Регистра СССР.

При проектировании небольших пассажирских судов может оказаться целесообразным ограничить также предельные углы крена, вызываемые действием ветра умеренной силы. В пределах применимости метацентрической формулы остойчивости необходимую для этой цели относительную начальную метацентрическую высоту

можно подсчитать по формуле, являющейся предыдущей:

$$\frac{h}{B} = \frac{p_a}{D} \frac{z_a}{B} \frac{S}{\theta},$$

где p_a — удельное давление ветра; z_a — крайнее плечо; S — площадь проекции надводных частей судна на диаметральноую плоскость. Для однотипных судов отношение $\frac{z_a}{B}$ изменяется в узких пределах.

Для быстроходных судов, а в сомнительных случаях и для судов других типов, остойчивость судна должна быть проверена в условиях циркуляции. Для этого может быть использована приближенная формула Г. А. Фарсова

$$\theta_{\max}^0 = 1,4 \frac{v^2}{\Delta L} \left(Z_s - \frac{T}{2} \right),$$

где $\theta_{\max}^0$ — максимально возможный крен на циркуляции (в градусах), который в данном случае рассматривается как заданная величина;

v — скорость судна на прямом курсе, м/сек.

Эту формулу можно представить следующим образом:

$$\frac{h}{B} = 0,70 \frac{v^2}{L} \frac{T}{B} \left(2 \frac{H}{T} - 1 \right) \frac{1}{\theta_{\max}^0};$$

$$\frac{h}{B} = 6,9 F_r^2 \frac{T}{B} \left(2 \frac{H}{T} - 1 \right) \frac{1}{\theta_{\max}^0},$$

где F_r — число Фруда.

В заключение остановимся на вопросе о несимметричном затоплении отсеков, при котором крен судна в первом приближении можно определить по известной из теории корабля формуле

$$\theta = \frac{\sigma}{V} \frac{(y - y_0)}{A + \Delta h},$$

где σ — объем затопленного отсека по исходную ватерлинию;

V — объемное водоизмещение;

y — координата центра тяжести затопленного отсека;

y_0 — координата площади действующей ватерлинии после затопления отсека;

Δh — изменение начальной метacentрической высоты после затопления отсека.

Рассматривая предельный угол крена как заданную величину, можно написать

$$\frac{h}{B} = \frac{\sigma}{V} \frac{y - y_0}{B} \frac{1}{\theta} = \frac{\Delta h}{B}.$$

В этой формуле

$$\Delta h = \frac{\pi}{V} \left(T + \frac{s}{2} - z_s - \frac{\Delta l}{V} \right);$$

$$y_0 = -b \frac{s}{S_0 - s};$$

$$z_s = \frac{s}{S_0 - s};$$

$$\Delta l = l + s l^2 + (S_0 - s) y_0^2,$$

- где θ — изменение средней осадки;
 z_s — координата центра тяжести затопленного отсека по высоте;
 Δl — потерянный момент инерции;
 l — момент инерции потерянной площади ватерлинии относительно оси, проходящей через ее центр тяжести;
 s — потерянная площадь ватерлинии;
 $(S_0 - s)$ — площадь поврежденной ватерлинии;
 b — координата центра тяжести потерянной площади ватерлинии.

Если элементы судна и его начальная метacentрическая высота были предварительно определены одним из указанных ранее способов, то аварийную остойчивость при несимметричном затоплении отсеков исследуют путем проверочных расчетов. Для этой цели необходимо предварительно подготовить схему расположения переборок в рассматриваемой части судна.¹

При более полном исследовании вопроса можно, задавшись предельным углом крена, предварительно рассмотреть ряд вариантов судна, отличающихся как соотношениями главных размеров и коэффициентами теоретического чертежа, так и расположением переборок. Найденные для отдельных вариантов значения $\left(\frac{h}{B} \right)_{\max}$ позволяют ограничить область приемлемых в отношении аварийной остойчивости значений относительной и абсолютной метacentрической высоты.

Для того чтобы в пределах возможных вариаций элементов судна отобрать более благоприятные решения, целесообразно также дополнительно исследовать остойчивость судна в различных условиях нагрузки с точки зрения взаимного расположения кривой метаци-

¹ Если теоретический чертеж к этому времени не разработан, то все величины, входящие в формулу для определения $\frac{h}{B}$, вычисляются по предварительным оценкам.

тров и кривой центров тяжести судна, как это указано в главе восьмой.

Во многих случаях при преобразовании уравнения остойчивости целесообразно исключить из него наряду с метacentрической высотой и отношение $\frac{H}{T}$. Для этого нужно выразить это отношение через другие элементы таким образом, чтобы удовлетворить тем или иным требованиям, предъявляемым к судну. В частности, например, для каждого рассматриваемого варианта гражданских судов минимальное отношение $\frac{H}{T}$ можно определять в соответствии с правилами, регламентирующими их надводный борт или расположение переборок. На ранних стадиях проектирования для этой цели можно воспользоваться таблицами и графиками, позволяющими приблизительно определить отношение $\frac{H}{T}$ и максимальную длину автономных отсеков.¹

Из изложенного следует, что в каждом частном случае можно найти ряд предельных (минимальных и максимальных) значений начальной метacentрической высоты и соответствующих им комбинаций элементов судна, являющихся следствием различных ограничивающих условий.

Дополнительные сведения об этом приведены в главах десятой и десятой при рассмотрении вопроса о построении кривых постоянных значений различных показателей.

§ 9. УРАВНЕНИЕ МЕТАЦЕНТРА В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ФОРМЕ

Дифференциальное уравнение остойчивости можно представить в виде разности двух полных дифференциалов

$$d\theta = dm - dZ_0,$$

где m — возмещение метacentра над килем.

В настоящем параграфе мы остановимся лишь на первом дифференциале правой части этого уравнения, рассматривая метacentр

$$m = F(x, \beta, B, T)$$

как функцию независимых переменных x, β, B, T .

При такой постановке задач

$$dm = \frac{\partial F}{\partial x} dx + \frac{\partial F}{\partial \beta} d\beta + \frac{\partial F}{\partial B} dB + \frac{\partial F}{\partial T} dT,$$

¹ Для этого могут быть, в частности, использованы данные, приведенные в § 9 и 10 главы десятой курса [38].

Пример для определенности

$$\tau_1 = k_1 \left(\frac{x}{l} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad \tau_2 = \frac{1}{k_2} \frac{x^2}{l}.$$

в соответствии с чем

$$z = k_1 \left(\frac{x}{l} \right)^{\frac{1}{2}} T; \quad \rho = \frac{1}{k_2} \frac{x^2}{l} \frac{\delta \pi}{T}.$$

Тогда

$$dz = \frac{1}{2} z \frac{dx}{x} - \frac{1}{2} z \frac{dT}{T} + z \frac{dT}{T};$$

$$d\rho = 2\rho \frac{dx}{x} - \rho \frac{\delta \pi}{\pi} - \rho \frac{dT}{T} + 2\rho \frac{dB}{B}.$$

Складывая последние равенства почленно, найдем

$$dm = \left(\frac{z}{2} + 2\rho \right) \frac{dx}{x} - \left(\frac{z}{2} + \rho \right) \frac{\delta \pi}{\pi} + (z - \rho) \frac{dT}{T} + 2\rho \frac{dB}{B}. \quad (153)$$

Пользуясь уравнением (153), нужно учитывать, что главные размеры судна связаны уравнением плавучести

$$\frac{dD}{D} = \frac{\delta \pi}{\pi} + \frac{dL}{L} + \frac{dB}{B} + \frac{dT}{T}.$$

При анализе влияния элементов судна на его начальную остойчивость нередко принимают $D = \text{const}$, пренебрегая изменениями нагрузки, связанными с изменением соотношений размеров. При этом условии

$$\frac{\delta \pi}{\pi} + \frac{dL}{L} + \frac{dB}{B} + \frac{dT}{T} = 0. \quad (154)$$

Из уравнения (153) следует, что дифференциал dm не зависит от величины dL . Это естественно, так как ни z , ни ρ не зависят от длины судна. Таким образом, уравнение (153) действительно и при дополнительном условии (154) в том случае, если предполагается, что изменение коэффициента общей полноты, ширины, осадки и водоизмещения компенсируется за счет изменения длины судна.

Ничего обстоит дело, если предполагается, что изменение водоизмещения компенсируется за счет какого-либо другого элемента, например за счет автоматического изменения осадки. В этом слу-

чае, исключив из уравнения (153) с помощью формулы (154) отношение $\frac{dT}{T}$, нетрудно найти

$$d\pi = \left(\frac{c}{2} + 2\rho \right) \frac{dz}{z} - 1 \frac{1}{2} z \frac{dB}{B} - (z - \rho) \frac{dL}{L} + (3\rho - z) \frac{dH}{B}.$$

При $z = \rho$ это уравнение совпадает с уравнением (153).

Таким же способом можно исключить из уравнения (153) ширину судна или коэффициент общей полноты.

§ 10. ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СУДНА НА ВОЗВЫШЕНИЕ МЕТАЦЕНТРА НАД КИЛЕМ

Полученное дифференциальное уравнение метacentra (153) можно использовать для исследования влияния изменений элементов судна на возвышение метacentra над основной линией. В дальнейших выкладках предполагается, что приращение водоизмещения и составляющих нагрузки, связанные с изменением z , B и T , компенсируются за счет соответствующего изменения длины судна таким образом, что во всех случаях равенство между весом судна и водоизмещением не нарушается. В соответствии с этим отпадает необходимость дополнительного учета уравнения плавучести.

Рассмотрим прежде всего случай, когда

$$dz = dB = dT = 0$$

и, следовательно,

$$\frac{d\pi}{dB} = 2 \frac{\rho}{B} = 2\tau_2 \frac{B}{T}, \quad (155)$$

где приблизительно

$$\rho = \frac{1}{k_2} \frac{\pi^2 B^3}{T}.$$

Учитывая, что для гражданских судов и военных кораблей коэффициент k_2 колеблется в пределах от 11,3 до 11,8, примем в качестве средней цифры $k_2 = 11,5$ и представим формулу (155) в виде

$$\frac{d\pi}{dB} = 0,173 \frac{\pi^2}{t} \frac{B}{T}. \quad (156)$$

Отношение $\frac{\pi^2}{t}$ для отдельных типов гражданских судов и классов военных кораблей довольно стабильно. В предварительных ориентировочных подсчетах можно принимать, что в среднем

$$\frac{d\pi}{dB} = c \frac{B}{T},$$

где $c = 2\tau_2 = 0,150 - 0,155$ — для транспортных судов и среднескоростных военных кораблей; для высокоскоростных военных кораблей $c \approx 0,17$.

Для рассмотренных ниже судов коэффициент c и отношение $\frac{d\pi}{dB}$ выражаются следующими цифрами:

Тип судна	π	t	$\frac{B}{T}$	c	$\frac{d\pi}{dB}$
Грузовое судно	0,78	0,70	2,3	0,150	0,35
Пассажирское судно	0,70	0,68	2,8	0,153	0,43
Линейный корабль	0,72	0,90	8,3	0,149	0,49
Эскадренный миноносец	0,70	0,50	3,0	0,169	0,61

Из этих примеров можно видеть, что увеличение ширины судна на 1 м приводит к приращению ординаты метacentra в среднем на 0,4 м для транспортных судов и 0,5 м — для военных кораблей. Этими цифрами можно руководствоваться для предварительных соображений, когда возникает вопрос о том, как изменять элементы судна для того, чтобы добиться необходимого уменьшения его начальной остойчивости.

Если ρ это время коэффициенты теоретического чертёжа еще не установлены, то целесообразно принимать численное значение коэффициента c по прототипу.

Рассмотрим аналогичную задачу в предположении, что

$$dz = dB = dT = 0$$

и, следовательно,

$$\frac{d\pi}{dT} = \frac{z - \rho}{T} = \tau_1 - \tau_2 \frac{B^2}{T^2}. \quad (157)$$

На рис. 39 приведены кривые ординаты центра тяжести $\frac{T}{B}$ и метacentra $\frac{\pi}{B}$ в функции относительной осадки $\frac{T}{B}$. В нижней части диаграммы при малых значениях $\frac{T}{B}$ разность $(z - \rho)$ имеет отрицательный знак, в соответствии с чем, как это следует из формулы (157), увеличение осадки приводит к снижению метacentra на величину

$$d\pi = \frac{z - \rho}{T} dT.$$

В верхней части диаграммы разность $(z - \rho)$ положительна, и, следовательно, увеличение осадки приводит к увеличению остойчивости метacentra от киле. Чем меньше отношение $\frac{T}{B}$, тем интенсивнее влияет увеличение осадки на снижение метacentra.



Рис. 39. Влияние изменения осадки на остойчивость судна.

Этот вывод имеет большое практическое значение, поскольку в процессе постройки и эксплуатации судна нередко подвергаются модернизации. Как правило, такая модернизация связана с перегрузкой судна и с перемещением его центра тяжести вверх. При малых отношениях ширины судна к осадке неблагоприятное влияние второго фактора частично компенсируется благоприятным влиянием увеличения осадки. При больших отношениях ширины к осадке неблагоприятное влияние обоих факторов суммируется.

Чем больше отношение ширины судна к его осадке, тем сильнее оно реагирует на перегрузку. Поэтому с рассматриваемой точки зрения целесообразно выбирать минимально допустимые значения отношения ширины к осадке. Однако ряд других факторов влияет в противоположном направлении. К их числу относятся возрастающие требования к непотопляемости судов, стремление усилить вооружение военных кораблей, стремление развить надстройки пассажирских судов для более эффективного их использования, введение сварных конструкций, облегчающих суда главным образом в низко расположенных частях, и т. п. Новые требования к тактическим и эксплуатационным элементам и отмеченные конструктивные изменения приводят к тому, что центр тяжести судов перемещается вверх. В конечном счете это компенсируется за счет увеличения отношения ширины судна к осадке.

Для получения конкретных цифр формулу (157) можно представить следующим образом:

$$\frac{dm}{dT} = 0,5 \left(\frac{c}{b} \right)^{\frac{1}{3}} - \frac{1}{11,5} \frac{c^2}{b} \frac{B^3}{T^2}.$$

Это выражение позволило определить следующие значения прогибной метacentра по осадке:

Тип судна	α	β	$\frac{B}{T}$	$\frac{dm}{dT}$
Грузовое судно	0,78	0,70	2,3	+0,13
Пассажирское судно	0,70	0,65	2,8	-0,06
Экспедиционный монитор	0,70	0,50	3,0	-0,19
Линейный корабль	0,72	0,60	3,3	-0,23

В рассмотренных случаях при увеличении осадки судна на 1 м лишь грузовое судно получало положительное приращение метacentра приблизительно на 0,1 м. Метacentр остальных судов снижался на 0,1—0,2 м.

В заключение остановимся на вопросе о влиянии изменения коэффициентов α и β на возмущение метacentра над килем. Об этом можно судить по формулам

$$dm = \left(\frac{x}{2} + 2\beta \right) \frac{dx}{x}; \quad dm = - \left(\frac{x}{2} + \beta \right) \frac{dx}{x}.$$

Но вдаваясь в детали, отметим, что изменение коэффициентов полноты ватерлинии влияет на положение метacentра и том же направлении, что и изменение ширины судна, но более интенсивно. Увеличение коэффициента общей полноты во всех случаях снижает метacentр.

Таким же образом можно исследовать влияние изменения элементов судна на положение метacentра при дополнительных условиях, например выраженных формулой (154).

§ 11. УРАВНЕНИЕ ОСТОЙЧИВОСТИ В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ФОРМЕ

Для конкретизации уравнения остойчивости, приведенного в предыдущем параграфе, остается лишь оставить полные дифференциал функции $Z_k = (H)$, который можно представить в виде

$$dZ_k = Z_k \left(\frac{d\beta}{\beta} + \frac{dH}{H} \right), \quad (159)$$

если β и H рассматриваются как независимые переменные.

Для более точного определения дифференциала dZ_k можно воспользоваться приемом постоянного пересчета моментов по прототипу, предложенным И. Г. Бурбоком [9], который приводит к уравнению остойчивости, аналогичному уравнению весов и дифференциальной форме. Ниже этот прием изложен в более общей постановке, чем в сочинении И. Г. Бурбока, и получаемое уравнение можно обобщить на уравнение остойчивости.

Получим, что для судна-прототипа известным являются размеры, веса, координаты в киле, и ординаты их центров тяжести. Требуется определить координаты ординаты центра тяжести судна, вычисленное изменение заданной суммы расстояний весов P , главных размеров L, B, T, H , коэффициентов α , β и коэффициентов a, b, c .

По аналогии с уравнением весов представим момент возмущенного судна

$$M = Z_k D \quad (160)$$

в виде суммы моментов переменных и постоянных весов

$$M = \sum P_i x_i + P_0 x_0, \quad (161)$$

где x_i и x_0 — ординаты центров тяжести переменных весов и суммы постоянных весов P .

Из уравнения (159) следует, что

$$dZ_k = \frac{Z_k}{M} dM = Z_k \frac{dD}{D} = \frac{dM}{D} = Z_k \frac{dD}{D}, \quad (162)$$

и, таким образом, задача сводится к определению полных дифференциалов dM и dD .

При принятой постановке задачи выражение под знаком суммы в уравнении (161) представляет собой функцию следующего вида:

$$\sum P_i x_i = \sum \beta_i, \quad L, B, T, H, x_i, a, b, c, \dots$$

$$dM = \frac{\partial M}{\partial z} dz + \frac{\partial M}{\partial L} dL + \frac{\partial M}{\partial B} dB + \frac{\partial M}{\partial T} dT + \frac{\partial M}{\partial H} dH + \left[\frac{\partial M}{\partial a} da + \frac{\partial M}{\partial b} db + \frac{\partial M}{\partial c} dc + \dots + \sum \frac{\partial M}{\partial \xi_i} d\xi_i + z_p dP + P dz_p \right] \quad (162)$$

Если z_p рассматривается как функция некоторого главного размерный 1 , то под $d\xi_i$ следует понимать полный дифференциал z_p по этим размерениям (так как в этом случае dM есть полный дифференциал в частных производных сложной функции). Частные же производные функции ξ_i по z_p берутся так, как это делается для независимых переменных.

Введем обозначение

$$[d\xi]_k = \frac{\partial M}{\partial H} dH + \frac{\partial M}{\partial a} da + \frac{\partial M}{\partial b} db + \frac{\partial M}{\partial c} dc + \dots$$

значения под $[d\xi]_k$ сумму приведенной осью моментов, возникающих произвольным изменением высоты борта и произвольных параметров $a, b, c, \dots$. Тогда уравнение (162) можно переписать следующим образом:

$$dM = \frac{\partial M}{\partial z} dz + \frac{\partial M}{\partial L} dL + \frac{\partial M}{\partial B} dB + \frac{\partial M}{\partial T} dT + [d\xi]_k + z_p dP + P dz_p + \sum \frac{\partial M}{\partial \xi_i} d\xi_i$$

Таким образом, первый член правой части уравнения (161) принимает вид

$$\frac{dM}{D} = \frac{\partial M}{\partial z} \frac{dz}{D} + \frac{\partial M}{\partial L} \frac{dL}{D} + \frac{\partial M}{\partial B} \frac{dB}{D} + \frac{\partial M}{\partial T} \frac{dT}{D} + \left[\frac{[d\xi]_k}{D} + z_p \frac{dP}{D} + \frac{P}{D} dz_p + \frac{1}{D} \sum \frac{\partial M}{\partial \xi_i} d\xi_i \right] \quad (163)$$

Второй член правой части уравнения (161) можно представить как

$$z_g \frac{dD}{D} = z_g \left[\frac{dz}{L} + \frac{dL}{L} + \frac{dB}{B} + \frac{dT}{T} \right] \quad (164)$$

Подставим в формулу (163) вместо обоих членов правой части их значения по формулам (163) и (164), приложим к дифференциальному уравнению центра тяжести судна:

$$dZ_g = \left(\frac{\partial Z_g}{\partial z} \frac{z}{D} - Z_g \right) \frac{dz}{z} + \left(\frac{\partial Z_g}{\partial L} \frac{L}{D} - Z_g \right) \frac{dL}{L} + \left(\frac{\partial Z_g}{\partial B} \frac{B}{D} - Z_g \right) \frac{dB}{B} + \left(\frac{\partial Z_g}{\partial T} \frac{T}{D} - Z_g \right) \frac{dT}{T} + \left[\frac{[d\xi]_k}{D} + z_p \frac{dP}{D} + \frac{P}{D} dz_p + \frac{1}{D} \sum \frac{\partial M}{\partial \xi_i} d\xi_i \right] \quad (165)$$

где dZ_g — полный дифференциал, который будет подробнее рассмотреть ниже.

¹ Обычно учитывается влияние на z_p лишь высоты борта и количества осадки.

Таким образом, для получения уравнения устойчивости в дифференциальной форме остается представить значения dM и dZ_g по формуле (163) или ее модифицирован в по формуле (165) в разносте

$$dM = dM_1 - dZ_g$$

Если последнее уравнение разложить совместно с обобщенным дифференциальным уравнением весов, то искомыми неизвестными являются $d\xi$, dL , dB , dT и dT . Если приравняем dM рассматривается не как заданная, а как искомого значения, то из дифференциала $[d\xi]_k$ в формуле (165) следует вывести слагаемое

$$- \frac{\partial M}{\partial H} dH$$

и рассматривать его как член, содержащий известную величину. Остальные неизвестные, входящие в первом члене правой части уравнения (165), можно легко вычислить из осевых данных по протону, если рассматривать dP как заданную величину. Таким образом, для того, чтобы пользоваться уравнением (165), необходимо лишь выразить переменные $d\xi$ и $d\xi$ в функциях главных размерений судна.

Практически, поскольку наименьшие данные для измерения судна мало влияют на ординату центра тяжести отдельных весов, плечи z_p обычно выражают одной из следующих формул, приведенных ранее в § 2 главы четвертой:

$$\begin{aligned} z_p &= z_1 H; \\ z_p &= z_2 H_1 = z_3 \left(H + z_4 \frac{L_1}{L} \right); \\ z_p &= z_5 H + z_6; \\ z_p &= z_7 T; \\ z_p &= z_8 T + z_9; \\ z_p &= \text{const.} \end{aligned}$$

где H_1 — приведенная высота борта;

L_1 — отрезок длины;

z_i — коэффициенты, определенные по протону.

Таким образом,

$$\begin{aligned} dZ_g &= z_1 dH; \\ dZ_g &= z_2 dH + z_3 d \left(L_1 \frac{L_1}{L} \right); \\ dZ_g &= z_5 dH + dZ_6; \\ dZ_g &= z_7 dT; \\ dZ_g &= z_8 dT + dZ_9; \\ dZ_g &= 0. \end{aligned} \quad (166)$$

Аналогичными формулами выразятся отдельные составляющие дифференциала dP , если вес P разлагается на несколько составляющих весов. В зависимости от поставленной задачи дифференциал dH можно рассматривать как известную или заданную величину.

Частные производные функции ξ , входящие в уравнение (165), удобно вычислять в табличной форме, руководствуясь значениями, приведенными при рассмотрении в главе пятой обобщенного дифференциального уравнения весов. Некоторые дополнительные указания по этому вопросу приводятся ниже.

При вычислении считаем

$$\frac{1}{D} \frac{\partial \psi_i}{\partial x_i} dx_i = \frac{1}{D} \frac{\partial \psi_i}{\partial x_i} \left(\frac{\partial x_i}{\partial L} dL + \frac{\partial x_i}{\partial B} dB + \dots \right)$$

можно иметь в виду, что члены x_i входят в функциональные зависимости ψ_i в виде множителей в первой степени. Поэтому

$$\psi_i = x_i P_i$$

и, следовательно,

$$\frac{\partial \psi_i}{\partial x_i} = P_i$$

На этом основании можно упростить вычисления, пользуясь соотношением

$$\frac{1}{D} \frac{\partial \psi_i}{\partial x_i} dx_i = \frac{P_i}{D} \left(\frac{\partial x_i}{\partial L} dL + \frac{\partial x_i}{\partial B} dB + \dots \right) = \frac{P_i}{D} dx_i$$

где относительный вес $\frac{P_i}{D}$ берется по загрузке простора, а dx_i вычисляется по формуле (166).

По той же причине при вычислении частных производных функций ζ по элементам судна можно пользоваться соотношением

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \zeta_i}{\partial x} &= x_i \frac{\partial P_i}{\partial x}; \\ \frac{\partial \zeta_i}{\partial L} &= x_i \frac{\partial P_i}{\partial L}; \\ \frac{\partial \zeta_i}{\partial B} &= x_i \frac{\partial P_i}{\partial B}; \\ \frac{\partial \zeta_i}{\partial T} &= x_i \frac{\partial P_i}{\partial T}. \end{aligned} \right\} \quad (167)$$

Численные значения частных производных весов, фигурирующие в формулах (167), можно непосредственно взять из таблицы, составленной для них численным коэффициентом дифференциального уравнения весов. В соответствии с этим, как показано в табл. 34, расчет производных сводится к нахождению частных производных весов на соответствующие члены x_i .

Если dH рассматривается как всякая величина, в табл. 34 необходимо предусмотреть дополнительные столбцы для частных производных весов и моментов

$$\frac{\partial P_i}{\partial H} \text{ и } x_i \frac{\partial P_i}{\partial H}.$$

Для подсчета величин, входящих в формулы (166), могут также потребоваться особые таблицы.

Таблица 34

Вычисление частных производных элементов веса, входящих в нагрузку судна

Страна нагрузки	Частные производные весов				Плечи x_i	$x_i \frac{\partial P_i}{\partial x}$	$x_i \frac{\partial P_i}{\partial L}$	$x_i \frac{\partial P_i}{\partial B}$	$x_i \frac{\partial P_i}{\partial T}$
	$\frac{\partial P_i}{\partial x}$	$\frac{\partial P_i}{\partial L}$	$\frac{\partial P_i}{\partial B}$	$\frac{\partial P_i}{\partial T}$					
Сумма	$\frac{\partial P}{\partial x}$	$\frac{\partial P}{\partial L}$	$\frac{\partial P}{\partial B}$	$\frac{\partial P}{\partial T}$		$\frac{\partial \zeta}{\partial x}$	$\frac{\partial \zeta}{\partial L}$	$\frac{\partial \zeta}{\partial B}$	$\frac{\partial \zeta}{\partial T}$

ОСТОЙЧИВОСТЬ СУДНА ПРИ РАЗНЫХ УСЛОВИЯХ НАГРУЗКИ И ПРИ БОЛЬШИХ УГЛАХ КРЕНА

§ 1. ВЗАИМНОЕ РАСПОЛОЖЕНИЕ КРИВЫХ МЕТАЦЕНТРОВ И ЦЕНТРОВ ТЯЖЕСТИ

Под кривой центров тяжести судна мы понимаем кривую, выражающую ординаты этих точек при разных состояниях нагрузки в функции осадки. Такое представление рассматриваемого параметра (рис. 40) носит условный характер, поскольку возмещение центра тяжести лишь косвенно зависит от осадки. В общем случае при одной и той же осадке ордината центра тяжести судна может иметь несколько значений, вследствие чего можно провести несколько кривых, выражающих интересующую нас зависимость.

Метацентрическую высоту судна в разных условиях эксплуатации можно получить как разность абсцисс двух кривых: кривой метацентриров и кривой центров тяжести судна. Желательно, чтобы при любых условиях нагрузки метацентрическая высота не выходила из определенных пределов. Чрезмерное увеличение устойчивости в некоторых условиях нагрузки является таким же неблагоприятным фактором в эксплуатационных условиях, как и излишнее отклонение начальной метацентрической высоты в меньшую сторону, что приводит к необходимости часто принимать жидкий балласт.

Для того, чтобы получить приемлемые результаты, кривая центров тяжести должна быть так расположена по отношению к кривой метацентриров, чтобы расстояния между ними не выходили из определенных пределов. Удовлетворительное расположение кривых показано на рис. 41, а, а неудовлетворительное — на рис. 41, б и в.

Возможности проектировщика влиять на форму кривых метацентриров и центров тяжести путем изменения элементов судна сравнительно ограничены, однако во многих случаях при разумном выборе соотношений элементов можно удовлетворительно решить поставленную задачу. С другой стороны, можно воздействовать на форму кривой центров тяжести путем изменения расположения расходных грузов, и в первую очередь топлива. Так, например, пере-

мещение жидкого топлива из динцевых цистерн в высокую поперечную цистерну позволяет уменьшить начальную устойчивость судна при нагрузке, соответствующей выходу в рейс. Начальная же метацентрическая высота при израсходованном топливе сохраняет свое прежнее значение.

Нижне поставленная задача рассматривается лишь в части, связанной с изменением элементов проектируемого судна. Всесторонний анализ начальной устойчивости под этим углом зрения можно заполнить путем сопоставления ряда вариантов судна. При этом, если речь идет об аффинном преобразовании судна-прототипа, соответствующее им значение ординаты метацентрира можно легко найти путем простейших пересчетов, рассмотренных в главе второй. В общем случае для этой цели можно воспользоваться приближенными способами построения кривой метацентриров, приведенными ниже.

В соответствии с изложенным при дальнейшем рассмотрении затронутого вопроса в общем плане ставится задача вывить лишь



Рис. 40. Кривая центров тяжести судна.
 $Z+V$ — исходная нагрузка.

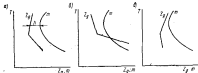


Рис. 41. Взаимное расположение кривых метацентриров и центров тяжести.

приближенный характер изменения кривых метацентриров и центров тяжести в зависимости от изменения соотношений главных размеров и коэффициентов теоретического чертежа.

§ 2. ПРИБЛИЖЕННЫЕ СПОСОБЫ ПОСТРОЕНИЯ КРИВОЙ МЕТАЦЕНТРОВ

В предыдущей главе при выводе приближенных формул для определения ординаты центра тяжести Z , метацентрического радиуса ρ и метацентрической высоты мы рассматривали вопрос при-

мгновенно к одному исходному состоянию загрузки, считая B , T , δ и α заданными величинами. Между тем при определении элементов судна приходится рассматривать его остойчивость в различных условиях загрузки. Поэтому уже в начальной стадии проектирования, когда теоретической чертёж еще не разработан, полезно построить кривую, приближенно характеризующую положение метacentра в зависимости от осадки судна.

Известные формулы теории корабля могут быть использованы для этой цели, если при приеме или сжатии груза выдвигание изменится не более чем на 10–15%. Кривую $m = z + p = f(T)$ можно построить также с помощью формул предыдущей главы, если считать, как это делается ниже, входящие в них аргументы переменными величинами.

В тех случаях, когда осадка судна меняется в относительно узких пределах, можно с достаточной точностью, несмотря на условность излагаемого способа, вычислять ординаты кривой метacentра, рассматривая судно как прямоугольный поплавок, для которого

$$V = ST,$$

причем $S = \text{const}$ в интервале изменения T от нуля до $T_{\max}$. В соответствии с этим при всех осадках $\delta = \alpha = \text{const}$ и, следовательно,¹

$$\varphi_1 = \text{const};$$

$$\varphi_2 = \text{const}.$$

Наконец, поскольку ширина судна остается неизменной, можно написать, учитывая, что $z_0 = \varphi_1 T_0$ и $p_0 = \varphi_2 \frac{B^2}{T_0}$,

$$m = \varphi_1 T + \varphi_2 \frac{B^2}{T} = z_0 \frac{T}{T_0} + p_0 \frac{T_0}{T}. \quad (168)$$

Рассмотрим теперь другой способ построения кривой метacentра, основывающийся на параболических кривых

$$z = z_0 \frac{L_0}{L} \frac{B_0}{B} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\alpha};$$

$$z = z_0 \frac{L_0}{L} \frac{B_0}{B} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\alpha},$$

где

$$\alpha = \frac{z_0}{z_0} - 1.$$

¹ Под φ_1 и φ_2 , как и раньше, понимаются функции от α и δ , входящие в выражения для определения z и p . Изменением судна отнесем также величину, относящуюся к конструктивной осадке.

В этом случае $\frac{\alpha}{\delta} = \text{const}$, и, следовательно, поскольку $\varphi_1 = \text{const}$, ординаты центра величины выразятся, как и для прямоугольного судна, следующим образом:

$$z = z_0 \frac{T}{T_0}. \quad (169)$$

Кроме того, как это следует из исходных формул,

$$\frac{\alpha}{\delta} = \frac{z_0}{z_0} \frac{L_0}{L} \frac{B_0}{B} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\alpha},$$

откуда

$$\varphi_2 = (\varphi_1) \frac{L_0}{L} \frac{B_0}{B} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\alpha}.$$

Далее, после подстановки значений φ_2 и $(\varphi_1)_{\delta_0}$ найдем

$$p \frac{T}{B^2} = p_0 \frac{T_0}{B_0^2} \frac{L_0}{L} \frac{B_0}{B} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\alpha}. \quad (170)$$



Рис. 42. Перестроение прямоугольной строевой по натуральным.

Из формулы (170) следует, что

$$p = p_0 \frac{L_0}{L} \frac{B_0}{B} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\alpha-1}. \quad (171)$$

Суммируя выражения для z и p , получим

$$m = z_0 \frac{T}{T_0} + p_0 \frac{L_0}{L} \frac{B_0}{B} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\alpha-1} \quad (172)$$

или в другом виде, учитывая исходные уравнения для определения α и δ ,

$$\left. \begin{aligned} m &= z_0 \frac{T}{T_0} + p_0 \frac{L_0}{B_0^2} \frac{B_0}{B} \frac{T_0}{T}; \\ m &= z_0 \frac{T}{T_0} + p_0 \frac{L_0}{B_0^2} \frac{B_0}{B} \frac{T_0}{T}. \end{aligned} \right\} \quad (173)$$

Формулы (173) отличаются от формулы (168) дополнительными множителями L_0/B_0^2 и B_0/B в последнем члене.

При некотором напоре можно получить хорошие результаты, основываясь на прямоугольной строевой по натуральным, построенной так, как это указано в § 1 главы седьмой. Прямоугольная строевая (рис. 42) заменится из-за плавной кривой, равносильной по площади. Преобразование строевой используется для вычисления по правилу трапеций частных значений $V = f(T)$ и $z = f(T)$, по-

сле чего определяются коэффициенты $\alpha = f(T)$ и $\delta = f(T)$ и строятся кривые r_1 и r_2 . Приступая к такому построению, целесообразно записать строивой по внутренним подкадкам судна-прототипа.

§ 2. НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА КРИВОЙ МЕТАЦЕНТРОВ

Представим уравнение метацентра следующим образом:

$$\frac{m}{B} = r_1 \frac{T}{B} + r_2 \frac{B}{T}.$$

На рис. 43 приведена кривая относительного возмущения метацентра над основной линией m/B в функции отношения осадки к ширине. Нетрудно убедиться, что при аффинных преобразованиях все подобные кривые, построенные для вариантов прямоственного судна, сольются.



Рис. 43. Кривая метацентра в относительной системе координат.

Это свойство кривой метацентра объясняется тем, что для прямоственного судна численные значения функций r_1 и r_2 , как было показано, не изменяются ни в случае перехода от одной осадки к другой при неизменных главных размерах судна, ни в случае изменения длины, ширины или осадки судна путем увеличения или уменьшения расстояний между шпангоутами, затерликами или батопсами.

Для судов нормальной формы численные значения функций r_1 и r_2 хотя и изменяются при переходе от одной осадки к другой, но сравнительно медленно. С другой стороны, независимо от формы судна эти функции сохраняют свои численные значения при изменении главных размеров судна так, как было указано. Поэтому и в общем случае можно приближенно признать, что кривая метацентра, построенная для любого-либо теоретического чертежа в относительных координатах m/B и T/B , не изменяется при любых перестройках теоретического чертежа, выполненных путем изменения масштабов чертежа по длине, ширине или высоте борта. Если отношение осадки к ширине меняется не более чем на 5%, то погрешность, вытекающая из неточности исходных допущений, послуживших для этого заключения, не превосходит погрешности обычных кораблестроительных расчетов по теоретическому чертежу. При приближенном рассмотрении задачи прямых допущения не вносят чрезмерной погрешности и в случае значительного изменения отношения осадки к ширине.

Для вариантов судна с несимметричными коэффициентами теоретического чертежа кривые метацентра, построенные в безразмерных координатах, также сравнительно мало отличаются друг от друга. Сказанное относится, в частности, к отношениям m/B и B/T , соответствующим минимуму рассматриваемой кривой.

Для прямоственного судна эти соотношения можно найти из формулы (168), которая после дифференцирования дает

$$\frac{dm}{d\left(\frac{T}{B}\right)} = z_0 - r_2 \left(\frac{T}{B}\right)^2.$$

Приравняв это равенство нулю, найдем, что отношение T_0/B , соответствующее минимуму кривой метацентра, определяется выражением

$$\left(\frac{T}{B}\right)_m = \sqrt{\frac{r_2}{r_1}}. \quad (174)$$

Таким образом, формула (168) дает для экстремальной точки

$$z_m - r_m = \sqrt{2r_2 r_1}. \quad (175)$$

и, следовательно,

$$m_m = 2\sqrt{2r_2 r_1}. \quad (176)$$

Подставив в формулу (174) значения z_0 и r_0 , найдем

$$\left(\frac{T}{B}\right)_m = \sqrt{\frac{r_1 r_2}{r_1 \frac{B}{T}}} = \frac{T}{B} \sqrt{\frac{r_2}{r_1}}. \quad (177)$$

и, поскольку $B = \cot \delta$,

$$\left(\frac{B}{T}\right)_m = \sqrt{\frac{r_1}{r_2}}. \quad (178)$$

Подобным образом после подстановки z_0 и r_0 формула (175) дает

$$\left(\frac{B}{T}\right)_m = 2\sqrt{r_1 r_2}. \quad (179)$$

Кроме того, из формул (178) и (179) следует, что

$$\left(\frac{m}{B}\right)_m = 2r_2 \left(\frac{B}{T}\right)_m.$$

Для прямоственного судна $\alpha = 4$; $r_1 = 0,5$; $r_2 = 0,067\alpha$, и, следовательно,

$$\left(\frac{m}{B}\right)_m = 0,416 \sqrt{\alpha}; \quad \left(\frac{B}{T}\right)_m = \frac{2,4}{\sqrt{\alpha}}.$$

Численные расчеты приводят к выводу, что для судов определенного типа рассматриваемые соотношения изменяются в узких пределах. В качестве средних цифр (для судов различного типа) можно назвать

$$\left(\frac{m}{B}\right)_m \approx 0,45; \quad \left(\frac{B}{T}\right)_m \approx 2,6.$$

§ 4. ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СУДНА НА КРИВЫЕ МЕТАЦЕНТРОВ И ЦЕНТРОВ ТЯЖЕСТИ

Остановимся вначале на кривой метацинтров и рассмотрим несколько частных случаев.

Случай 1. *Влияние изменений главных размеров судна при афигном преобразовании теоретического чертежа.* Поскольку в этом случае кривая метацинтров судна-прототипа, построенная в безразмерных координатах, остается практически неизменной, задача может быть сведена к исследованию изменений кривой $\frac{m}{B} = f\left(\frac{T}{B}\right)$ при переходе от относительных к абсолютным координатам. Перестроение же исходной диаграммы сводится к изменению масштаба чертежа по осям абсцисс и ординат в B раз.

Абсциссы кривой метацинтров в абсолютной системе координат можно определять также аналитически по формуле

$$m = \left(\gamma_1 \frac{T}{B} + \gamma_2 \frac{B}{T}\right) B \quad (180)$$

и отложить в функции $T = \left(\frac{T}{B}\right) B$.

Из формулы (180) следует (рис. 44), что при изменении ширины судна значения m , соответствующие отдельным точкам исходной диаграммы, будут линейно изменяться от нуля (при $B = 0$) до некоторой конечной величины. Иначе говоря, первоначальные точки кривой m/B будут перемещаться по лучам, проведенным из начала координат. Каждый луч соответствует определенному значению отношения m/B в безразмерной диаграмме $\frac{m}{B} = f\left(\frac{T}{B}\right)$.

Изменение осадки судна, как показывает формула (180), не сопряжено с изменением формы кривой метацинтров и равносильно перемещению рассматриваемой точки по кривой (переход с одного луча на другой). Изменение длины судна не оказывает влияния ни на форму кривой метацинтров, ни на расположение отдельных точек кривой.

Переходя к вопросу о зависимости формы кривой метацинтров от коэффициентов ξ и α , рассмотрим следующие случаи.

Случай 2. *Оба коэффициента изменяются в одинаковой пропорции.* При заданной осадке судна, если $dB = dT = 0$, уравнение метацинтра (153) в дифференциальной форме дает

$$dm = \left(\frac{\gamma}{2} + 2\rho\right) \frac{dx}{\alpha} - \left(\frac{\gamma}{2} + \rho\right) \frac{d\beta}{\alpha}. \quad (181)$$

Так как по условию

$$\frac{d\alpha}{\alpha} = \frac{d\beta}{\beta},$$

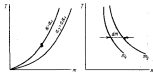


Рис. 45. Преобразование кривой m при изменении ξ и α .

то из формулы (181) следует, что

$$dm = \rho \frac{dx}{\alpha}. \quad (182)$$

Полученный результат можно отнести ко всей кривой $m = f(T)$, если рассматривать метацинтральный радиус $\rho = f(T)$ как величину переменную.

В тех случаях, когда при перестроении теоретического чертежа (рис. 45) абсциссы строений по интервалам изменяются в одинаковой пропорции, причем для сопоставляемых судов

$$S_2 = \alpha S_1,$$

то при $L; B = \text{const}$

$$\alpha_2 = \alpha_1$$

и, следовательно,

$$\frac{dx}{x} = \text{const}. \quad (183)$$

Таким образом, в этом случае

$$dm = \text{const} \cdot \rho.$$

Приблизительно тот же результат получается, если условие (183) не соблюдается особенно строго. Поэтому с качественной точки зрения можно считать, что рассматриваемое перестроение кривой $\pi = f(T)$ сводится к перемещению ее параллельно оси абсцисс, подобно тому, как это показано на правой половине рис. 45.

Случай 3. Коэффициент α изменяется при $\delta = \text{const}$. В этом случае кривые $\alpha = f(T)$ располагаются так, как это показано на рис. 46. При этом для данной осадки (поскольку $dT = d\delta = 0$) дифференциальное уравнение метacentра дает

$$dm = \left(\frac{\varepsilon}{2} + 2\rho \right) \frac{d\alpha}{\alpha} = \left(\frac{\alpha}{2} + 1,5\rho \right) \frac{d\alpha}{\alpha}$$

(так как $\pi = \varepsilon + \rho$).

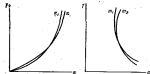


Рис. 46. Преобразование кривой метacentров при изменении α .

Опишем эту зависимость ко всей кривой метacentров, рассматривая по аналогии с предыдущим случаем π и ρ как величины переменные по осадке судна. Тогда при принятом в левой половине рис. 46 расположении кривых малым осадкам будут соответствовать отрицательные приращения dm , так как $dx = x_2 - x_1 < 0$. При больших осадках будет наблюдаться обратная картина.

В конечном счете исходная кривая метacentров претерпит изменение, которое может быть охарактеризовано как поворот вокруг точки, для которой $d\alpha = 0$.

Для численного решения рассмотренных задач можно использовать приближенные формулы, приведенные ранее.

Рассмотрим теперь вопрос о влиянии элементов судна на форму кривой центров тяжести. При этом будем исходить из предположения, что при всех состояниях нагрузки коэффициенты ξ в формуле

$$(Z_g) = \xi H \quad (184)$$

можно рассматривать как постоянные. Изменения нагрузки и водоизмещения, связанные с изменением элементов судна, как и в предыдущих случаях, не будут приниматься во внимание. Это равно-

сильно предположению, что водоизмещение судна сохраняется на должном уровне за счет изменения его длины, которое не оказывает влияния ни на кривую центров тяжести, ни на кривую метacentров. Из формулы (184) следует, что при принятых выше допущениях форма кривой центров тяжести зависит исключительно от высоты борта и осадки.

При рассмотрении кривых центров тяжести мы сталкиваемся со следующими частными случаями.

Случай 4. Высота борта изменяется с H_0 на H при $T = \text{const}$. При таком изменении высоты борта все аппликат $(Z_g)_0$ изменяются



Рис. 47. Преобразование кривой Z_g при изменении H .



Рис. 48. Преобразование кривой Z_g при изменении T .

пропорционально отношению H/H_0 . Поэтому исходная кривая центров тяжести переместится (несколько деформируясь) вдоль оси абсцисс так, как показано на рис. 47.

Случай 5. Осадка судна изменяется при $H = \text{const}$. Рассматриваемый случай соответствует предположению, что судно испытывает или садится глубже вследствие изменения его элементов. Это не оказывает влияния на значения аппликат $(Z_g)_0$, отсчитываемых от основной плоскости. Однако одноименные состояния нагрузки для судна-прототипа и нового судна наступают при разных осадках. В результате (рис. 48) исходная кривая центров тяжести переместится вдоль оси ординат.

§ 5. ВЗАИМНОЕ РАСПОЛОЖЕНИЕ КРИВЫХ МЕТАЦЕНТРОВ И ЦЕНТРОВ ТЯЖЕСТИ

В предыдущем параграфе мы показали, что ширина судна B и коэффициенты α и β оказывают влияние исключительно на кривую метacentров, а осадка T и высота борта H — исключительно на кривую центров тяжести.

Если требуется увеличить или уменьшить начальную остойчивость судна во всех случаях нагрузки, это можно сделать за счет

изменяли B , λ или H . Увеличение или уменьшение T или α является наиболее эффективным средством изменения соотношений между метacentрической высотой в разных условиях нагрузки. Оно позволяет уменьшить колебания начальной устойчивости судна на протяжении рейса.

В случае афинного преобразования теоретического чертежа судна-прототипа можно пояснить сказанное с помощью рис. 49. На этом рисунке приведены две кривые $m = f(T)$ прямоугольных понтонов шириной $B = 10$ м, для которых в безразмерных координатах

$$\frac{\alpha}{B} = 0,5 \frac{T}{B} + \frac{1}{18} \frac{B}{T}.$$

Кривые 1 и 2 характеризуют возвышение центра тяжести понтона при осадках $(T_0)_{\text{пр}}$ для судна-прототипа и $T_0 = \frac{B}{8} (T_0)_{\text{пр}}$ для судна со сниженной осадкой. Осадки изменяются в следующих пределах:

Судно-прототип	T_{max}	T_{min}
Вариант	6,0	3,6
	4,0	2,0

Рис. 49. Совместное перестроение кривых m и Z_c .

Кривые 3 и 4, приведенные на диаграмме, были получены путем увеличения абсцисс точек кривых 1 и 2 в одинаковой пропорции. Они иллюстрируют влияние, оказываемое увеличением высоты борта или коэффициента λ .

Значения начальной метacentрической высоты, полученные при составлении кривых метacentров, соответствующих понтонам шириной $B = 8$ м и $B = 10$ м, с кривыми 1 и 2, выражаются следующими цифрами:

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4
$B = 8,0$	$T_{\text{max}} = 4,0$	1,00	0,75	0,65
	$T_{\text{min}} = 6,0$	1,70	0,60	0,30
$B = 10$	$T_{\text{max}} = 4,0$	1,75	1,25	2,20
	$T_{\text{min}} = 6,0$	2,10	1,40	1,30

Таким образом для понтонов с максимальной осадкой $T_{\text{max}} = 4$ м можно в настоящем случае стабилизировать метacentрическую высоту в разных условиях нагрузки, так что ее колебания не превышает $\Delta h = 0,35-0,45$ м. При $T_{\text{max}} = 6$ м метacentрическая высота изменяется в рейсе на 0,8 м при $B = 10$ м и на 1,4 м при $B = 8$ м.

Путем уменьшения коэффициента α при $\lambda = \text{const}$ можно было бы снизить значения m , соответствующие большим осадкам, что

привело бы к более стабильным значениям метacentрической высоты понтон с большой осадкой.

В заключение отметим, что рассмотренную задачу исследовать, пользуясь безразмерной системой координат. Поскольку при таком представлении результатов кривая метacentров остается неизменной, этот путь позволяет ограничиться преобразованием кривой центров тяжести, уравнение которой принимает вид

$$\frac{(Z_c)_0}{B} = \xi \frac{H}{T} \frac{T}{B}.$$

Затронутый вопрос рассмотрен подробнее в курсе [28].

§ 4. ПРИМЕРЫ ПРИЛОЖЕНИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В предыдущих параграфах были изложены приемы исследования устойчивости проектируемого судна, позволяющие в каждом частном случае снизить колебания начальной метacentрической высоты в различных условиях нагрузки. Ниже приводятся примеры, позволяющие судить о практических результатах, которые можно получить таким путем.

При разработке проекта одного из траулеров соотношения главных размеров и коэффициенты теоретического чертежа были выбраны на основе анализа трех возможных прототипов. Кривые m/B этих траулеров приведены на рис. 50. Кривая 1 относится к траулеру I с U-образными шпангоутами, кривая 2 — к траулеру II с умеренно V-образными шпангоутами, а кривая 3 — к траулеру III с подрезанным носом. Особенности формы рассматриваемых траулеров, а также формы, принятой в разработанном проекте (траулер IV), можно охарактеризовать следующими коэффициентами теоретического чертежа:

Коэффициенты	I	II	III	IV
Общая высота	0,599	0,574	0,549	0,566
Половина грузовой накатки	0,737	0,812	0,810	0,800
и мидель-шпангоута	0,852	0,842	0,863	0,885
Вертикальной палубы	0,751	0,707	0,967	0,706

Первые три траулера послужили, в свою очередь, прототипами для ряда вариантов, отличающихся соотношениями главных раз-

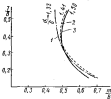


Рис. 50. Кривые m/B трех траулеров.

мерений. Ниже приведены значения метациентрической высоты в разных условиях нагрузки, соответствующие наиболее удачным вариантам по каждому прототипу, а также аналогичные цифры по разработанному проекту.

Состояние нагрузки	I	II	III	IV
При выходе на промысел	0,75	0,80	0,87	0,80
« возвращении с промысла	0,64	0,69	0,73	0,75
То же, с колесными грузами	0,64	0,65	0,68	0,64
Вел. груза, с остатками топлива и воды	0,70	0,52	0,44	0,53
Пороженем	0,70	0,52	0,37	0,53

Приведенные данные показывают, что принятые в качестве прототипов траулеры не равноценны по остойчивости. Первый траулер-прототип характерен тем, что его начальная метациентрическая высота варьирует в разных условиях нагрузки в очень узких пределах. Для рассматриваемых случаев отклонение не превышает 11 см. При таких же незначительных нагрузках метациентрическая высота третьего траулера с подрезанным носом дает отклонения до 50 см. Второй траулер занимает в этом отношении промежуточное место ($\Delta h = 37$ см).

Таким образом, если исходить из требования относительной стабилизации метациентрической высоты траулеров, следовало бы отдать предпочтение первому прототипу. С другой стороны, третий прототип с подрезанным носом (обводы Майера) обладал наилучшими ходовыми качествами. В соответствии с этим теоретический чертеж последнего траулера был переделан, и путем соответствующего выбора соотношений главных размеров и изменения обводов удалось получить решение, приемлемое по условиям как остойчивости, так и ходкости.

В качестве второго примера рассмотрим некоторые данные по проекту грузового судна длиной в 4400 м при водоизмещении 6700 т. Ниже приведены элементы, соответствующие двум вариантам судна, отличающимся соотношениями главных размеров. Теоретический чертеж по второму варианту был разработан на основе теоретического чертежа, принятого для первого варианта судна, путем изменения расстояний между шпангоутами и водерлиниями:

Судно	L	B	H	T	z	$\frac{L}{B}$	$\frac{B}{T}$	$\frac{H}{T}$	$\frac{L}{H}$
I	305,0	15,3	7,3	5,34	0,68	6,90	2,56	1,21	14,6
II	300,0	14,8	7,8	6,32	0,68	6,75	2,27	1,20	12,4

Элементы судна по первому варианту были выбраны исходя из оценок, ограниченной заданием. Это в известной мере предопределило соотношения его главных размеров. Элементы судна по второму варианту, отличающемуся более благоприятными показателями остойчивости, не удовлетворяли требованиям задания.

Приводим значения начальной метациентрической высоты составных частей судна:

Состояние нагрузки	Судно I	Судно II
Судно в полном грузу в начале рейса	1,00	0,99
То же, в конце рейса	1,07	0,90
Судно с 50% грузом в начале рейса	1,57	1,01
То же, в конце рейса	1,97	1,24
Судно порожнем с балластом в двойном дне и якорнике	2,60	1,53
То же, с балластом только в якорнике	2,62	1,24
Судно порожнем	2,75	1,43

Приведенные цифры показывают, что судно по первому варианту отличается чрезмерной остойчивостью как при плавании с грузом, так и в разгруженном состоянии. В балластном пробеге его метациентрическая высота превосходит метациентрическую высоту при плавании в полном грузу на 1,6 м. Показателем остойчивости судна по второму варианту значительно более благоприятны, причем расхождение между метациентрической высотой судна в полном грузу и в балластном пробеге не превышает 0,94 м.

Из изложенного следует, что вопрос о форме кривых метацентрических центров тяжести имеет большое практическое значение. Рекомендуется уделять ему должное внимание при определении элементов проектируемого судна.

§ 2. ПРИБЛИЖЕННЫЕ ФОРМУЛЫ ПЛЕЧ СТАТИЧЕСКОЙ ОСТОЙЧИВОСТИ

Для приближенного построения диаграммы восстанавливающих плеч можно воспользоваться формулами, предложенными В. Г. Пласовым [11], Н. А. Зайтковым [15], В. Л. Подхизным [39], А. Н. Востужаевым [6] и др. Мы приводим ниже в окончательном виде лишь формулу В. Г. Пласова, которая чаще других используется в отечественной практике¹. Для извлечения некоторых вычетов, входящих в формулы В. Г. Пласова и других авторов, можно использовать приближенные значения, приведенные в упомянутых работах [39] и [6], а также в работе А. Б. Заменского [17], которые также приведены в настоящем параграфе.

С. Н. Пласовский привел формулу В. Г. Пласова к следующему удобному для практических расчетов виду:

$$l_0 = (z_0 - \frac{1}{2}) f_0 + y_{00} f_0 + x_0^2 f_0 + y_{00}^2 f_0. \quad (100)$$

В эту формулу входят координаты центра тяжести x_0 и y_{00} , а также метациентрические расстояния r и r_{00} для судна в начальном положении и при его

¹ Формулу В. Г. Пласова можно получить как частный случай из более точной, но в то же время и более сложной формулы Н. А. Зайткова в предположении, что извлекаемые объемы корпусов ниже и выше грузовой ватерлинии равны.

наклонен на 90° . Функции от угловых перемещений в формулах (185) выражаются следующим образом:

$$f_1(\theta) = \sin \theta - \frac{1}{8} \sin 4\theta - \frac{1}{32} (25 \sin 2\theta - 9 \sin 6\theta);$$

$$f_2(\theta) = -\frac{1}{8} \sin 4\theta + \frac{1}{32} (25 \sin 2\theta - 9 \sin 6\theta);$$

$$f_3(\theta) = \frac{1}{8} \sin 4\theta - \frac{1}{32} (\sin 2\theta - 3 \sin 6\theta);$$

$$f_4(\theta) = \frac{1}{8} \sin 4\theta + \frac{1}{32} (\sin 2\theta - 3 \sin 6\theta).$$

При углах наклона в пределах от 0 до 90° функции $f_i(\theta)$ принимают следующие численные значения:

θ°	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
$f_1(\theta)$	-0,038	-0,241	-0,536	-0,779	-0,913	-0,995	-0,995	-0,995	-0,995	1,000
$f_2(\theta)$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0
$f_3(\theta)$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0
$f_4(\theta)$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0

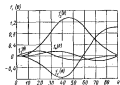


Рис. 51. Значение функций, входящих в формулу составившихся ялец.

ческий чертёж еще не разработан. С этой целью В. Л. Полюхин предложил следующие формулы, полученные статистическим путем:

$$\rho_m = 0,5 \left(1 - 0,96 \frac{T}{H_2} \right) B;$$

$$\varepsilon_m = \varepsilon = 0,64 \left(1 - 1,03 \frac{T}{H_2} \right) H_2$$

где H_2 — приведенная высота борта, которая вычисляется по формуле

$$H_2 = \left(1 + \frac{1}{\pi} \frac{V_{\text{вн}}}{V_{\text{в}}} \right) H, \quad (186)$$

$V_{\text{вн}}$ — объемное вытеснение при осадке $T = H$;

$V_{\text{в}}$ — объем непроходимых частей корпуса ялца затравки, вшитой на уровне верхней палубы у миделя.

Таким образом, в $V_{\text{в}}$ входит объем корпуса в пределах осадкиности и ялца борта и объем надстроек, которые учитываются в расчете остойчивости на больших углах крена.

Кроме того, В. Л. Полюхин имел теоретическую зависимость приближенную зависимость:

$$\rho_m = \left(\frac{\varepsilon_m - \varepsilon}{H_2} \right)^2 \varepsilon; \quad (187)$$

Выражен ε формулой

$$\varepsilon = \gamma_0 \frac{H_2^3}{T},$$

можно представить выражение (187) в виде

$$\rho_m = 2,1 \gamma_0 \left(\frac{1 - 1,03 \frac{T}{H_2}}{1 - 0,96 \frac{T}{H_2}} \right)^2 \frac{H_2}{T} \frac{H_2^3}{B}.$$

А. Б. Замесский, учитывая, что в выражении (185) член, содержащий ρ_m , не имеет существенного значения, предложил определять его по формуле

$$\rho_m = 0,7 (\varepsilon_m - \varepsilon).$$

А. Б. Замесский имел также уточненные, но более сложные формулы для определения B_m и $(\varepsilon_m - \varepsilon)$:

$$\begin{aligned} \rho_m = B \left[0,015 + 0,03 \varepsilon + \frac{\delta}{4} (0,14 \varepsilon + 0,107) \right] + \\ + \frac{1}{4} B_2 \left[\varepsilon (0,14 \varepsilon + 0,107) - 0,549 \frac{\delta}{\varepsilon + 1,19} \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_m - \varepsilon = H_2 \left[\frac{\delta}{2} + \frac{1}{12} \frac{\varepsilon}{\delta} \left(2 - \frac{H_2}{T} \right) + \frac{1 - \delta}{2} (0,801 - 0,30 \varepsilon_2) \right] + \\ + \frac{T}{6} \left(\delta - \frac{1}{2} \frac{\varepsilon}{\delta} \right) - \frac{1}{2} \varepsilon; \end{aligned}$$

$$H_2 = H + 2,2 \frac{(H - T) V_{\text{в}} + M_{\text{в}} + T \gamma_0 V_{\text{в}}}{(H - T) (S + 25 H_2)}.$$

- где: S — площадь затравки;
 $V_{\text{в}}$ — объем части корпуса в пределах осадкиности;
 $M_{\text{в}}$ — статический момент этого объема относительно затравки, пробитой на уровне верхней палубы у миделя;
 γ_0 и γ_1 — объемы непроходимых надстроек и вытеснение из центров тяжести над конструктивной затравкой;
 γ_1 — коэффициент площади борта, пробитого на расстоянии $V_{\text{в}}$ от диаметральной плоскости ($\gamma_1 = 0,85$);
 γ_2 — коэффициент бочковой палубы, равный отношению коэффициента общей вытесности полного объема судна к коэффициенту площади диаметра;
 δ — относительная длина палубы.

Напомним что означены величина, вычеркнутые на уровне верхней палубы у миделя.

Для определения объема V_k и V_d можно воспользоваться формулами, приведенными в главах шестой и седьмой.

А. Н. Воеуглавский предлагает для определения R_m формулу

$$R_m = 0,56 R_{max} + R_m (1 - \delta),$$

где R — параметр, определяемый по формулам

$$R = 48 R_{max} \left[0,1 - 0,133 \frac{B_{max}}{V_n} (S_k - 0,25 F_d) \right] -$$

для судна с умеренной осадкой и

$$R = 48 R_{max} \left(0,027 - 0,0653 \frac{B_{max} S_k}{V_n} \right) -$$

для судов с равным развалом бортов и большой осадкой.

В последних двух формулах приняты следующие обозначения:

S_k — площадь диаметрала;

F_d — площадь плоской части борта, если судно имеет цилиндрическую вставку.

§ 2. ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СУДНА НА ЕГО ОСТОЙЧИВОСТЬ ПРИ БОЛЬШИХ УГЛАХ КРЕНА

Для получения более конкретного представления о влиянии формы судна на форму кривой восстанавливающих плеч рассмотрим численные примеры.

Остановимся прежде всего на траулере, остойчивость которого можно охарактеризовать кривыми $(y_L) \cos \varphi$, $(z_L) \sin \varphi$, $\sigma_L \sin \varphi$ и суммарной кривой восстанавливающих плеч I_L , приведенными на рис. 52. Метacentрическая высота траулера и расстояние между центром тяжести и центром buoyancy равны соответственно $h = 0,85$ м и $a = 1,05$ м.

Приведенные данные позволяют построить кривые восстанавливающих плеч для трех новых вариантов траулера, отличающихся шириной, осадкой и положением центра тяжести. Для этого был использован способ пересчета по протоколу, изложенный в § 5 главы второй.

Соотношения между элементами исходного и трансформированных вариантов судна указаны ниже (как и раньше, через b и t обозначены отношения B/B_0 и H/H_0).

Величины	Варианты			
	I	II	III	IV
b	1,00	1,05	1,00	1,00
t	1,00	1,00	1,05	1,00
σ	0	0	0	-0,14
h	0,85	1,00	0,85	1,00

Кривые восстанавливающих плеч рассматриваемых вариантов траулера сопоставлены на рис. 53. Сравня кривые I и II, нетрудно убедиться, что уширение судна на 5% привело к существенному уве-

личению восстанавливающих плеч, что, однако, является следствием не улучшения формы судна, а увеличения его начальной метacentрической высоты на 0,14 м. Действительно, кривая IV показывает, что значительно лучшие результаты можно получить, сохранив обводы прототипа и увеличив его метacentрическую высоту до 1,0 м путем снижения центра тяжести судна на величину $\sigma a = 0,14$ м.

Диаграмма восстанавливающих плеч судна с увеличенной осадкой при неизменном отношении высоты борта к осадке (кривая III) отличается меньшими восстанавливающими плечами, чем диаграмма, построенная для основного варианта, до угла крена в 60° .

Изменение коэффициента полноты грузовой материи с клапанной стороны влияет на остойчивость так же, как и изменение ширины судна. Восстановление этого коэффициента приводит к увеличению восстанавливающих плеч при одновременном увеличении начальной метacentрической высоты. Компенсируя это увеличение начальной



Рис. 52. Кривые, характеризующие остойчивость траулера на больших углах крена.

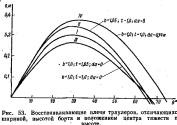


Рис. 53. Восстанавливающие плечи траулера, отличающегося кривой, высотой борта и положением центра тяжести по высоте.

стойчивости путем уменьшения ширины судна или изменения расположения грузов, мы пришли бы к судну с худшей диаграммой восстанавливающих плеч по сравнению с прототипом.

Это положение иллюстрируется ниже сопоставлением диаграмм

восстанавливающих плеч трех вариантов грузового судна с одинаковыми главными размерениями

$$L = 134,5 \text{ м}; \quad H = 11,2 \text{ м}; \\ B = 18,6 \text{ м}; \quad T = 7,0 \text{ м}$$

и одинаковой водоизмещающей $D = 13280 \text{ м}^3$.

Судна, обозначенные ниже римскими цифрами, отличаются обводами, их начальную остойчивость можно охарактеризовать следующими цифрами:

Величины	I	II	III
ρ	3,50	4,25	3,30
λ	3,70	3,85	3,70
m	7,60	8,10	7,60
Z_g	7,10	7,30	7,13
A	0,60	0,90	0,47

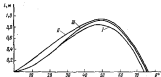


Рис. 54. Диаграммы восстанавливающих плеч трех вариантов грузового судна.

Вариант I относится к судну с обычными обводами, а вариант II — к судну с подрезанным носом (обвода Майера) и увеличенным коэффициентом полноты грузовой ватерлинии. Судно по варианту III в подводной части не отличается от судна по варианту I, а в надводной части имеет значительно больший развал палубы.

Составляя диаграммы восстанавливающих плеч трех рассматриваемых вариантов грузового судна, приведенные на рис. 54, следует отметить, что все они удовлетворяют обычным требованиям, которые предъявляются к остойчивости судов. При углах крена больших 40° кривая восстанавливающих плеч III почти сливается с кривой II, несмотря на то, что начальная метacentрическая высота судна по третьему варианту меньше на 43 см. Изменяя соотношение главных размерений судна по второму варианту для положения его центра тяжести с таким расчетом, чтобы начальная метacentрическая высота была во всех трех случаях примерно одинаковой, мы пришли бы к судну с кривой восстанавливающих плеч,

лежащей значительно ниже, чем аналогичные кривые, вычерченные для других вариантов.

Вплоть к началному участку форма кривой остойчивости (как на кривых I и III) оказывает благоприятное влияние на поведение судна на взволнованном море, и лишь необходимость обеспечить аварийную остойчивость при несимметричном затоплении отсеков

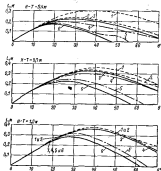


Рис. 55. Диаграммы восстанавливающих плеч траулера при метacentрической высоте $h = 0,7 \text{ м}$.

могли бы оправдать увеличение начальной метacentрической высоты на 40—43 см для получения больших восстанавливающих плеч в начальном участке диаграммы.

Увеличение относительной высоты борта к осадке является эффективным средством улучшения диаграммы восстанавливающих плеч, если оно не сопровождается неоправданно возрастанием ординаты центра тяжести судна. Эффект от увеличения высоты надводного борта при сохранении первоначального значения метacentрической высоты можно иллюстрировать рис. 55, на котором представлены диаграммы восстанавливающих плеч шести траулеров (кривые I—VI). Траулеры составляются при трех осадках, соответствующих надводному борту в 0,4; 0,7 и 1,0 м. Во всех случаях диаграммы

рассматриваемых судов приведены к одинаковой начальной метacentрической высоте в 0,7 м за счет соответствующего изменения положения центра тяжести.

Сопоставляемые траулеры отличаются друг от друга как водоизмещением, так и соотношением главных размеров и формой обводов. В соответствии с этим возвышение метacentра над килем различных траулеров не одинаково, а так как все диаграммы восстанавливающих плеч приведены к одинаковой метacentрической высоте, то различиям оказывается и возвышение центра тяжести траулеров над килем.

Это обстоятельство, наряду с другими, менее существенными особенностями рассматриваемых траулеров, привело к тому, что при одинаковом надводном борте и одинаковой метacentрической высоте диаграммы восстанавливающих плеч отдельных траулеров значительно отличаются друг от друга. Однако, несмотря на эти различия, увеличение отношения высоты борта к осадке во всех случаях приводит к увеличению восстанавливающих плеч и к смещению максимума диаграмм и их углов заката в сторону больших углов крена.

Всего увеличение запаса плавучести в основном корпусе или непроницаемых надстройках также благоприятно влияет на остойчивость судна при больших углах крена. Об этом, в частности, свидетельствуют кривые I и III на рис. 54.

При выборе соотношений элементов проектируемого судна нужно стремиться обеспечить необходимую остойчивость на больших углах крена при минимальной начальной остойчивости. В соответствии с этим, использованный выше прием сравнения остойчивости судов путем приведения диаграммы восстанавливающих плеч к одинаковой метacentрической высоте имеет общее значение для оценки качества формы сопоставляемых судов.

Подводя итог выводам настоящего параграфа, следует отметить, что при одинаковой метacentрической высоте наиболее благоприятная диаграмма восстанавливающих плеч будет соответствовать судну с минимальной шириной, наиболее низким положением центра тяжести и наибольшим отношением H/T . При одинаковой метacentрической высоте, как это было показано при сопоставлении трех вариантов грузового судна, U-образные обводы имеют преимущество перед V-образными, однако увеличение развала шпангоутов в надводной части, как и любое другое средство увеличения запаса плавучести, оказывает благоприятное влияние на остойчивость судна.¹

Снижение положения центра тяжести судна имеет настолько существенное значение, что при проектировании некоторых типов гражданских судов (например, промысловых и пассажирских), от-

личающихся высоким положением центра тяжести, предусматривают прием твердого балласта в целях получения лучших показателей остойчивости на больших углах крена. Применение твердого балласта позволяет уменьшить ширину судна, что уменьшает, а иногда сводит на нет предное влияние увеличения водоизмещения на сопротивление. На неподвижном море благоприятное влияние уменьшения ширины становится особенно ощутимым.

Применение легких сплавов в высоко расположенных конструкциях также является эффективным средством снижения центра тяжести судна.

¹ Вопрос о влиянии формы шпангоутов на ходовые качества судна рассмотрен автором в работе [30].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОЕКТИРУЕМОГО СУДНА

§ 1. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ ТЕОРИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДОВ.
ГЛАВНЫЕ И ОБЩЕННЫЕ НЕИЗВЕСТНЫЕ

К числу главных неизвестных, которые должны быть определены на первом этапе разработки проекта, обычно относят главные размеры судна и основные коэффициенты теоретического чертежа $L, B, T, H, \delta, \alpha, \beta$ и предположении, что все прочие элементы и характеристики проектируемого судна можно уточнить на последующих этапах разработки проекта. Определив главные неизвестные, мы тем самым фиксируем водоизмещение, мощность механизмов и некоторые другие характеристики судна, связанные с ними определенными функциональными зависимостями.

Таким образом, выбран в качестве главных неизвестных отмеченные выше величины, мы лишем уравнения плавучести и устойчивости их самостоятельного значения при определении элементов проектируемого судна. Практически их используют в этом случае для того, чтобы заранее исключить водоизмещение и мощность механизмов из уравнения веса.

Деление исходных неизвестных на главные и прочие неизвестные в значительной степени условно. В частности, например, при решении некоторых задач полезно относить к числу главных неизвестных абсциссу центра величины. С другой стороны, иногда удобно оперировать уравнениями плавучести и устойчивости, рассматривая их как самостоятельные уравнения. В подобных случаях водоизмещение судна и мощность механизмов должны рассматриваться как дополнительные неизвестные (по терминологии В. Л. Полюшко — *обобщенные неизвестные*).

Обратимся теперь к уравнениям теории проектирования судов, которые используются для определения перечисленных неизвестных. Эти уравнения можно разбить на следующие группы.

1. Аналитические уравнения.
2. Зависимости, выраженные с помощью графиков или таблиц.
3. Эмпирические зависимости вида

$$\varphi = f_1(P); \quad \beta = f_2(\varphi); \quad \alpha = f_3(\varphi),$$

связывающие оптимальные (если исходить из требований гидродинамики и из других условий) значения коэффициентов теоретического чертежа с относительной скоростью хода.

4. Санки, устанавливаемые при графической проработке задачи.

5. Зависимости, выполнение которых устанавливается с помощью проверочных расчетов.

6. Зависимости вида

$$\begin{aligned} Q &\rightarrow D_{\text{мех}}; & q &\rightarrow q_{\text{мех}}; \\ N &\rightarrow N_{\text{мех}}; & Q &\rightarrow Q_{\text{мех}}. \end{aligned}$$

согласно которым водоизмещение судна, мощность механизмов и себестоимость перевозок груза должны быть наименьшими, а провозная способность — наибольшей из практически возможных.

Лишь немногие условия, которым должно удовлетворять спроектированное судно, выражаются в виде конкретных аналитических зависимостей, приписанных к первой группе. К их числу в первую очередь относится уравнение веса и уравнение устойчивости, имеющие наиболее общее значение. При проектировании грузовых, грузо-пассажирских и промысловых судов можно использовать уравнение вместимости. В отдельных случаях применяется также уравнение удифферентовки (обычно возможность удифферентовки проверяется последующими расчетами).

Не останавливаясь на вопросе о степени точности функциональных зависимостей, используемых в уравнениях теории проектирования судов, отметим, что из перечисленных уравнений только уравнение веса является принципиально строгим, так как каждое судно должно удовлетворять закону Архимеда. Уравнение же устойчивости, в котором метacentрическая высота фигурирует в виде произвольного параметра, является по сути дела неравенством, ограничивающим пределы допустимых изменений рассматриваемой величины в исходном состоянии нагрузки.

Конкретизируя это уравнение применительно к требованиям, предъявляемым, с одной стороны, к устойчивости судна в неповрежденном состоянии и аварийных условиях, а с другой — к поведению судна на волноломном море, и учитывая при решении этой задачи изменение начальной метacentрической высоты в различных условиях нагрузки, можно получить ряд модификаций уравнения устойчивости. Каждая из них ограничивается с одной рассматриваемой точки зрения пределами изменения элементов судна.

Переходя к уравнению вместимости, в котором удающую погрузочную кубитурку можно рассматривать как произвольный параметр, следует отметить, что и оно является по сути дела неравенством. Задача ограничивает обычно нижний предел этого параметра, и лишь при проектировании судов, предназначенных для специализированных перевозок, избыточная кубитурка в трюмах

должна рассматриваться как нежелательное, но в некоторых случаях неизбежное явление.

Уравнение дифференциалки связывает длину судна с выбранным значением обобщен центра величины, которое целесообразно задавать исходя из требования гидромеханики. Таким образом, с формальной точки зрения уравнение дифференциалки выражает вполне определенное требование. Все же и это уравнение в известной мере условно, поскольку наиболее выгодное положение центра величины можно установить в каждом частном случае лишь приближенно. С другой стороны, возможность отступать в некоторых пределах от оптимального положения центра величины, без существенного увеличения сопротивления, позволяет отнести этот параметр к числу произвольных параметров.

О характере связей, отнесенных ко второй группе, можно составить себе представление по уравнению надводного борта.

Напомним, что надводный борт, а следовательно, и отношение высоты борта к осадке гражданских судов, подпадающих под действие правил о грузовой марке, определяются исходя из их размеров и конструктивных та же функциональными зависимостями, выражаемыми в таблицах. На математическом языке эти зависимости можно выразить равенством

$$\frac{H}{T} = aF\left(\xi, L, \frac{L}{H}, \frac{b_p}{L}, M, f\right), \quad (188)$$

где a — произвольный коэффициент, равный или больший единицы; L — расчетная длина надстроек; M — мера седловатости; f — погонь балласта.

Формулу (188) можно рассматривать как уравнение надводного борта гражданских судов, подпадающих под действие правил о грузовой марке. В том же условном смысле можно говорить об уравнении тонотопливности гражданских судов, подпадающих под действие правил Международной конвенции по охране человеческой жизни на море. По сути дела и эти уравнения должны рассматриваться как неравенства, ограничивающие нижний предел высоты надводного борта и фактора подразделения отсеков.

Принятые в начале этого параграфа эмпирические зависимости, используемые для определения коэффициентов ξ , β , α , весьма приближены. Кроме того, незначительные отступления от оптимальных значений этих коэффициентов не вызывают существенного увеличения сопротивления или ухудшения других качеств судна. Это обстоятельство используется часто для того, чтобы соотвечствующим выбором численных значений рассматриваемых коэффициентов более полно удовлетворять другим требованиям, положенным в основу разрабатываемого проекта.

Графическая проработка задачи позволяет установить минимальные габаритные размеры судна, а в первую очередь минимальную

длину, необходимую для размещения помещений, устройств и оборудования.

Связи, отнесенные к пятой группе, также выражают лишь минимальные требования, предъявляемые к тем или иным качествам судна, например к углу крена и надводному борту при несимметричном затоплении оговоренного числа отсеков.

Переходя к зависимостям пятой группы, следует отметить, что они в известной мере условны, так как, изменяя элементы судна с целью улучшить какой-либо из его показателей, мы неизбежно ухудшаем некоторые другие показатели. Таким образом, в наиболее общем случае требования, выражаемые уравнениями, входящими в рассматриваемую систему, частично несовместимы. Поэтому при выборе решения субъективные элементы обычно играют существенную роль.

Из изложенного следует, что при определении элементов проектируемого судна можно воспользоваться большим количеством различных зависимостей. Несмотря на это, рассматриваемая задача не однозначна, так как все эти зависимости, за исключением уравнений весов, представляют собой неравенства, которым можно удовлетворять лишь путем компромиссного решения задачи.

§ 2. ТЕХНИЧЕСКИЕ, ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ТЕХНИКО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ СУДНА

О качестве судна как сооружения, служащего для перевозки груза и пассажиров, добычи рыбы и морского зверя, переработки улова и пр., можно судить по его техническим и экономическим показателям. В настоящем параграфе рассматриваются лишь показатели, представляющие интерес при сопоставлении проектных вариантов судна.

Остановимся вначале на грузовых судах.

Если сопоставляемые варианты судна удовлетворяют всем требованиям заданий и равноценны по компоновке и оборудованию, то в качестве технических показателей качества судна можно принять водоизмещение D , мощность механизмов N и эксплуатационную скорость хода $v_{\text{эк}}$.

В числе экономических показателей, не содержащих вычитки, которые измеряются в денежных единицах, наиболее существенное значение имеет прововная способность судна, выраженная в тоннах или тонно-милях. Поскольку речь идет о судах, специально предназначенных для перевозки груза, прововная способность, выраженная в тонно-милях, характеризует работу, которую судно способно совершить. Если судно используется на одной линии, прововная способность определяется по формулам

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= v_{\text{эк}} P_{\text{пр}}; \\ Q_2 &= v_{\text{эк}}^2 P_{\text{пр}}. \end{aligned} \right\} \quad (189)$$

где γ_0 и γ_0' — коэффициенты использования грузоподъемности, характеризующие среднюю загрузку судна в рейсах; n — число рейсов на протяжении навигации;

$r = \sum r_i$ — путь, пройденный судном в рейсы, который устанавливается суммированием расстояний между портами r_i . Под коэффициентами использования грузоподъемности понимаются множители

$$\gamma_0 = \frac{\sum(\gamma_i)}{n}; \quad \gamma_0' = \frac{\sum(\gamma_i')}{r},$$

где n — число пробегов судна в рейсы, или, что то же, — число посещаемых им портов, включая порт приписки;

(γ_i) — коэффициент загрузки судна на протяжении одного пробега.

В тех случаях, когда провозная способность может фигурировать в расчетах в любой из отмеченных форм, она в дальнейшем обозначается буквой Q без индекса, а соответствующий ей коэффициент загрузки — символом γ_0 без верхнего индекса.

Число рейсов в равенствах (189) определяется по формуле

$$n = \frac{t}{\tau} = \frac{t}{\tau_x + \tau_{rp} + \tau_{cr}},$$

где t — продолжительность навигации;

τ — продолжительность рейса;

τ_x — ходовое время;

τ_{rp} — продолжительность грузоперевозок;

τ_{cr} — продолжительность стоянок или грузоперевозок.

Для данного судна при определенных условиях эксплуатации показатель τ_{cr} рассматривается как величина постоянная. Она складывается из следующих составляющих:

продолжительности маневрирования, швартовки, отшвартовки;

простоя по метеорологическим условиям, например вследствие шторма, препятствующего выходу судна в море, сильного дождя,

при котором невозможны грузоперевозки, сильного ветра, препятствующего работе кранов;

продолжительности вспомогательных операций; к их числу относятся оформление грузовых документов, выполнение таможенных формальностей, подготовка трюмов к погрузке, уничтожение девиаций; сюда же относятся простои, вызванные отсутствием трехместной работы, перерывами на обед, праздничными днями и пр.; непроизводительных простоев вследствие сдвигания причалов, рабочих, буксиров и складов, а также вследствие неисправности судовых и береговых механизмов, несвоевременного пополнения судовых запасов и пр.

Ходовое время в рейсе и продолжительность грузоперевозок можно подсчитать по формулам

$$\tau_x = \frac{r}{v_{sm}};$$

$$\tau_{rp} = \sum \frac{P_i}{\mu_i}. \quad (190)$$

где P_i — количество принятого или выданного в каждом порту груза;

μ_i — норма погрузки и выгрузки в единицу времени.

Выразив вес P_i в долях усредненного веса груза $\gamma_0' P$, перевезенного на судне, равенствами

$$P_i = \beta_i \gamma_0' P,$$

можно представить формулу (190) в виде

$$\tau_{rp} = \frac{\gamma_0' P \sum \beta_i}{\mu},$$

где μ — усредненная техническая норма грузоперевозок, или, иначе говоря, вес груза, перерабатываемого в среднем в портах в единицу времени.

Если в каждом порту происходит полная смена груза, то $\beta_i = 1$ и, следовательно,

$$\sum \beta_i = 2n_p;$$

$$\tau_{rp} = \frac{2\gamma_0' P n_p}{\mu}.$$

Применяемые формулы позволяют легко определить провозную способность судна.

В качестве второго показателя, не содержащего величин, которые измеряются в денежных единицах, отметим производительность труда экипажа, или, иначе говоря, — отношение провозной способности к численности экипажа. Этот показатель представляет интерес главным образом в тех случаях, когда провозная способность серии судов рассматривается как заданная величина, а грузоподъемность и скорость судов — как независимые переменные. При такой постановке задачи производительность труда, исчисленная для всей серии судов, может изменяться в относительно широких пределах.

Из показателей, содержащих величины, которые измеряются в денежных единицах, отметим в первую очередь соотношение, характеризующее удельные капитальные затраты

$$k = \frac{K}{Q}$$

и себестоимость перевозки груза

$$q = \frac{S}{Q},$$

где K — строительная стоимость судна, S — эксплуатационные расходы.

Применяется также комплексный показатель, отличающийся от себестоимости перевозки груза, исчисленной по провозной способности Q_1 или Q_2 , наличием дополнительного члена, соответственно равного

$$\Delta q_1' = \alpha K_1, \quad \Delta q_2' = \frac{\alpha K}{r},$$

где $\alpha = \frac{1}{T_n}$ — нормативный коэффициент окупаемости капитальных затрат;

T_n — срок окупаемости капитальных затрат.

По идее комплексный показатель может заменить показатели k и q при оценке вариантов судна. Обычно в морском судостроении принимают $\alpha = 0,1$.

При определении себестоимости перевозки груза часто принимают во внимание и оборотные средства, заключенные в грузах во время их транспортировки. Их учитывают дополнительным членом, который в зависимости от способа исчисления провозной способности определяется по одной из следующих формул:

$$\Delta q_1'' = b \frac{c}{365}; \quad \Delta q_2'' = b \frac{c}{365r},$$

где c — средняя стоимость «весовой единицы груза (с учетом его композиции и длительности перевозки отдельных партий);

b — доля начисляемых оборотных средств.

Таким образом, себестоимость перевозки груза можно выразить показателем

$$q: q + \Delta q_1'; q + \Delta q_2'; q + \Delta q_1' + \Delta q_2'.$$

В тех случаях, когда при сопоставлении двух вариантов судна имеют

$$K_1 > K_2;$$

$$S_1 < S_2,$$

и, следовательно, показатели приводят к противоречивым выводам, предпочтение отается варианту с меньшим сроком окупаемости

$$T_{ок} = \frac{K_1 - K_2}{S_2 - S_1}.$$

если он не превосходит регламентированного срока окупаемости T_p . В противном случае выбирают вариант с меньшими эксплуатационными расходами.

Расчет рентабельности судна сводится к определению валового дохода за год R_p , чистого годового дохода $R = R_p - S$ и срока окупаемости капитальных затрат

$$T_{ок} = \frac{K}{R} = \frac{K}{R_p - S}.$$

Для грузовых судов каботажного плавания валовой доход исчисляется в соответствии с действующими тарифами на перевозку грузов, исходя из провозной способности судна. Расчет в известной мере условен, так как тарифы разрабатываются с учетом фактических условий эксплуатации существующих морских судов. Неясно поэтому, в какой мере можно считать действующие тарифы показателями для перспективных расчетов, и в частности расчетов, которые выполняются для определения оптимальной скорости хода проектируемых судов. Во всяком случае в подобных расчетах необходимо учитывать прогрессивные тенденции, ведущие к сокращению продолжительности грузовых операций и непроизводительных стоянок в портах.

Уместно отметить, что оптимальная скорость хода, обеспечивающая максимальную рентабельность, возрастает по мере уменьшения чистого годового дохода. Если же $R_p = S$, то оптимально становится скорость хода, при которой себестоимость перевозок достигает минимума.

Расчеты экономических показателей грузовых судов, эксплуатируемых на заграничных линиях, имеют некоторые особенности. Не останавливаясь на них, перейдем к судам других типов.

При анализе эффективности пассажирских судов вместо себестоимости перевозки груза подсчитывается себестоимость перевозки одного пассажира. Иногда ее определяют с учетом затрат на содержание «целового» пассажира в рейсе (выплачиваемая заработная плата, командировочные и пр.). Кроме того, определяется годовой доход и срок окупаемости капитальных затрат.

Анализ эффективности промысловых судов сводится к определению количества продукции, выработанной за год, ее себестоимости, дохода от реализации продукции и срока окупаемости капитальных затрат.

При определении и суммировании эксплуатационных расходов удобно разбивать их на следующие группы, более укрупненные, чем группы во официальной номенклатуре.

1. Отчисления и амортизационный фонд для погашения стоимости судна и стоимости капитального ремонта. Стоимость среднего и текущего ремонта.¹ Стоимость малого снабжения.

¹ В настоящее время вводится система планово-предупредительного ремонта, исключая категорию среднего ремонта.

Расходы этой группы определяют в процентах от отпускной стоимости судна.

2. Расходы на содержание экипажа, которые определяют расчетом на основе штатного расписания и должностных окладов — отдельно для эксплуатационного периода (с учетом надбавок за службу лет, за плавание в Арктике и т. п.) и отдельно для периода ремонта при уменьшенном составе команды. К этому нужно добавить расходы на оплату отпусков, сверхурочных работ и начислений на социальное страхование, а также расходы на столовое довольствие во время эксплуатации и ремонта судна.

В приближенных экономических расчетах расходы по содержанию экипажа обычно определяют по укрупненным измерителям, отнесенным к одному члену экипажа и охватывающим все виды расходов. Такие измерители выведены по отдельным пароходствам и типам судов.

3. Способность нарастающего топлива, масла и обшивочных материалов, которая определяется детальными расчетами.

4. Оплаты судовых сборов (корабельного, лоцманского, за проход по каналу и пр.) и агентирования; капитальные расходы, к которым относятся расходы на приобретение карт, книг, инструментов и канцелярских принадлежностей, а также плата за пресную воду, стирку белья и т. п.

5. Общие и административно-управленческие расходы, которые относятся к числу косвенных расходов. Их начисляют обычно в процентах от заработной платы.

Пусть S_0 — расходы, которые равномерно распределяются в течение всего года (амортизационные отчисления, затраты на содержание экипажа и пр.), S_{st} , S_{sp} , S_{cr} — дополнительные расходы в течение ходового времени, при грузовых операциях и прочих стоянках. Тогда

$$S = S_0 + S_{st} + S_{sp} + S_{cr}$$

Обозначив суточные затраты символами

$$\begin{aligned} s_0 &= \frac{S_0}{n}; & s_{st} &= \frac{S_{st}}{n \cdot t_p}; \\ s_{sp} &= \frac{S_{sp}}{n \cdot t_p}; & s_{cr} &= \frac{S_{cr}}{n \cdot t_{cr}}. \end{aligned}$$

найдем

$$S = n(s_0 + s_{st} + s_{sp} + s_{cr} \cdot t_{cr})$$

или в другом виде

$$S = n[(s_0 + s_{st}) + (s_0 + s_{sp}) \cdot t_p + (s_0 + s_{cr}) \cdot t_{cr}].$$

Практические данные, необходимые для экономических расчетов, охарактеризованных выше, можно найти в работах, посвященных экономике морского транспорта, в частности в книге [44], а также в официальных нормативных изданиях.

Уместно отметить, что экономические показатели, не содержащие величин, исчисленных в денежных единицах, можно определить с той же степенью точности, что и технические показатели судна.¹ При расчете же показателей, связанных с денежными единицами измерения, возникает ряд затруднений, оказывающих неблагоприятное влияние на точность результатов. Наиболее существенное значение имеют следующие обстоятельства.

В начальных стадиях разработки проекта стоимость судна обычно определяется по укрупненной разбивке веса, входящих в нагрузку судна, без учета влияния соотношений главных размеров и коэффициента общей полноты. Применение этого способа при подсчете себестоимости перевозки груза и удельных капитальных затрат по сопоставляемым вариантам судна вносит в расчеты большую условность.

Расчеты по определению себестоимости перевозки груза не отражают должным образом расходов порта на обслуживание судна и, следовательно, не учитывают интересов народного хозяйства в целом. Между тем для снижения расходов на портовые сооружения выгодно комплектовать торговый флот судами, которые при заданной грузоподъемности имели бы сравнительно малую длину и осадку.

При определении себестоимости перевозки груза некоторые затраты исчисляются исходя из отпускной стоимости судна. Затраты же на топливо и другие материалы определяют большей частью по префискурнтным ценам. Строго говоря, две отмеченные категории затрат не должны сопоставляться непосредственно, так как при образовании префискурнтных цен учитываются составляющие, которые не входят в отпускную стоимость судна.

На основании этого следует, что методика определения элементов судна, основанная на сопоставлении экономических показателей ряда вариантов решений, требует еще дальнейших уточнений. С другой стороны, как это показано ниже, при анализе некоторых задач, возникающих на практике, можно получить достаточно полное представление о наиболее выгодном решении, сопоставляя варианты судна по их провальной способности и относительному расходу топлива. В подобных случаях решение задачи не связано с какими-либо техническими трудностями.

В заключение остановимся на технико-эксплуатационных показателях грузовых судов. Технико-эксплуатационными мы будем называть показатели, характеризующие те или иные технические качества судна, дающие известное представление об его эко-

¹ Дело не заключается от того, что численные значения коэффициентов использования грузоподъемности в формуле для определения провальной способности выбираются за основаны более или менее удачных предположений об использовании судна. Действительно, не менее условны некоторые допущения, применяемые в расчетах технических показателей (например допущения о падении скорости хода в эксплуатационных условиях).

комичности. К их числу относятся: коэффициент утилизации водовращения по ледяному $\eta_{\text{вл}}$, удельная эластичность трюмов μ , отношение объема трюмов к кубическому модулю W/LBH или к суммарному объему корпуса W/W_0 , адмиралтейский коэффициент C , удельное сопротивление R/D , пропульсивный коэффициент $\eta_{\text{пр}}$, удельный расход топлива, относительный вес топлива, удельная мощность и пр. Рассмотрим подробнее последние два показателя. Относительный запас топлива

$$\pi = \frac{P_T}{W P}$$

выражает запас топлива в долях веса груза, перевозимого на судне. Численно этот показатель равен отношению суммарного веса топлива $P_T^{(1)}$, израсходованного на протяжении навигации, к провозной способности судна, так как

$$\pi = \frac{P_T \pi}{W_0 P_0} = \frac{P_T^{(1)}}{Q}$$

Стоимость топлива составляет значительную часть эксплуатационных расходов. Поэтому относительный вес топлива дает некоторое представление об экономичности судна.

В некоторых задачах, как это показано в § 4 и 9, применяя этот показатель, можно значительно упростить расчеты, выполняемые для определения оптимальных значений скорости хода и коэффициента общей полноты. В общем же случае, не отражая затрат, не зависящих от мощности механизмов, он не может заменить другие экономические показатели.

Под удельной мощностью¹ понимается отношение

$$x = \frac{N}{P_{\text{пр}} D} = \frac{N}{\eta_{\text{пр}} D v}$$

Если мощность механизмов выражена в метрических лошадиных силах, то

$$x = \frac{1}{75} \frac{1}{\eta_{\text{пр}}} \frac{1}{v_{\text{км}}} \frac{R}{D}$$

С другой стороны,

$$\frac{R}{D} = \frac{1}{\gamma^2} \frac{540}{C} \text{Pr}_A^2$$

При обычных соотношениях между относительной скоростью судна и коэффициентом общей полноты адмиралтейский коэффи-

¹ Этот показатель предложен С. В. Лайнером. За границей используется аналогичное показателем N/D_0 .

циент грузовых судов с данной грузоподъемностью представляет собой величину сравнительно стабильную. Удельное же сопротивление судна R/D , как это следует из последней формулы, быстро возрастает с увеличением числа Фруда по водонемещению. Одновременно при $P = \text{const}$ уменьшается коэффициент утилизации водонемещения $\eta_{\text{вл}}$ (вследствие увеличения мощности механизмов и уменьшения коэффициента общей полноты) и пропульсивный коэффициент (при постоянном диаметре винта).

Из отмеченного следует, что удельная мощность судна быстро возрастает с увеличением относительной скорости. Кроме того, она возрастает с падением ледяиста вследствие уменьшения коэффициента $\eta_{\text{вл}}$. Поэтому рассматриваемым показателем можно пользоваться лишь при сопоставлении вариантов судна, спроектированных по одному заданию, или при сравнении судов с одинаковой грузоподъемностью и скоростью хода.

Вместо удельной мощности можно предложить другой, более стабильный показатель

$$k' = \frac{C_0}{\eta_{\text{вл}} D v} = k \frac{\gamma}{P_{\text{пр}}^2},$$

который мы будем называть обобщенным адмиралтейским коэффициентом. В последней формуле $C_0 = \frac{W}{D P_{\text{пр}}^2}$ — величина обратная адмиралтейскому коэффициенту, k — переходный коэффициент. Численные значения k' определяются качеством формы судна (с учетом сопротивления воды и взаимодействия гребного винта с корпусом), качеством двигателя и степенью использования водонемещения судна для транспортировки грузов.

§ 1. СПОСОБ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЙ

Метод последовательных приближений как общее направление, принятое при определении элементов проектируемого судна, можно свести к различным расчетным схемам. В соответствии с этим в дальнейшем наряду с термином «метод последовательных приближений» мы будем пользоваться термином «способ последовательных приближений» в тех случаях, когда речь пойдет о конкретном воплощении этого метода в виде определенной схемы.

При определении элементов судна методом последовательных приближений в первом приближении используется одно или несколько уравнений, имеющих определенный физический смысл, а недостающие уравнения заменяются статистическими зависимостями. Полученное решение используется как база для дальнейших проверочных расчетов и графической проработки вопроса, цель которых — уточнить практические коэффициенты, использованные в исходных уравнениях, и установить, а какой мере удовлетворяются

те требования, положенные в основу разработанного проекта, которые не получили отражения в исходных уравнениях. Такой анализ целесообразно разбить на несколько этапов или приближений, используя результаты, полученные в каждом последующем приближении. Для корректировки элементов судна, найденных в предыдущем приближении.

Естественно, что отдельные приближения должны располагаться в определенной последовательности, обеспечивающей получение сходящегося ряда решений. Поэтому при разработке расчетной схемы следует иметь в виду, что основные аналитические уравнения теории проектирования судов в их наиболее элементарной форме не отражают достаточно точно существа явления, так как отбрасывают укрупненные веса, входящие в нагрузку судна, положение центров тяжести этих весов, сопротивление воды движению судна и т. п. Нельзя выразить простыми аналитическими зависимостями. Поэтому уместно пользоваться этими упрощениями и другими аналогичными уравнениями лишь при решении задачи в первом приближении.

В последующих приближениях целесообразно пользоваться более сложными, но в то же время и более точными приемами. В частности, нагрузку судна и параметры его остойчивости можно уточнить путем подробных расчетов по протолину. Значительные этапы можно посвятить последовательным задачам² и, в частности, анализу замеченных соотношений элементов с точки зрения остойчивости, непотопляемости, весовых соотношений, экономичности судна и т. п. При рассмотрении отдельных частных аспектов такой анализ возможен и в промежуточных приближениях.

Метод последовательных приближений не может быть канонизирован в виде какой-либо вполне определенной схемы, которой необходимо следовать при проектировании судна любого типа и назначения. В зависимости от специфики проекта и навыков проектировщика схему решения задачи можно изменять как в отношении содержания работ, выполняемых на том или другом этапе, так и в отношении частных приемов и формул, используемых на отдельных этапах.

Предлагаемая ниже интерпретация способа последовательных приближений иллюстрируется примером определения элементов грузового судна, для которого заданы: чистая грузоподъемность в тоннах P , скорость хода в узлах v , а также тип максимальной устойчивости, дальность плавания, удельная кубатура груза, комплектация экипажа и т. п. Предлагаемую схему решения задачи следует рассматривать как один из возможных способов применения этого метода при проектировании грузового судна. Некоторые соображения о применении способа последовательных приближений при проектировании судов других типов приведены ниже.

² В дальнейшем этот вопрос рассмотрен в рамках метода вариаций.

Первое приближение. Заданность коэффициентом utilization во-
дотоннажа по чистой грузоподъемности γ , определенным изложен-
ные судна:

$$D_1 = \frac{P}{\gamma}.$$

а затем его относительную длину по формуле

$$L_0 = 2,33v^{\frac{1}{3}}$$

или другой аналогичной формуле. После этого можно подсчитать длину судна

$$L_1 = L_0 D^{\frac{1}{3}}$$

и число Фруда, соответствующее заданной скорости хода,

$$Fr = \frac{v \sqrt{L_1}}{V_{g1}} = \frac{v}{V_{g1}}$$

Используя одно из соотношений вида

$$\xi = a - b Fr,$$

найдем коэффициент обшей полноты, а затем произведение

$$B_1 T_1 = \frac{D_1}{\gamma L_1}$$

Последняя формула позволяет определить ширину судна и его осадку, для чего необходимо либо задаться отношением B/T , либо определить это отношение с помощью уравнения остойчивости

$$\frac{B}{T} = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{L}{B} \right) \frac{B}{T} - \frac{\gamma_1}{\gamma} + \frac{\xi}{\gamma} \frac{H}{T}.$$

Во втором случае необходимо предварительно подсчитать значения коэффициентов $\beta = f(\xi)$; $\alpha = f(\xi, B)$; $\gamma_1 = f_1(\xi, \alpha)$; $\gamma_2 = f_2(\xi, \alpha)$ и задаться соотношениями H/T и L/B в соответствии с требованиями к грузовой марке и требованиями, предъявляемыми к остойчивости судна. Значения коэффициента ξ устанавливаются по протолину.

После этого остается найти высоту борта

$$H_1 = T_1 \frac{H}{T}.$$

определить по приближенной формуле мощность механизмов N_1 и проверить выполнение условия

$$D_1 = \gamma_1 L_1 B_1 T_1.$$

Второе приближение. Составляем перечень нагрузки, распределяя вес корпуса по кубическому модулю. Перечень можно представить в следующей форме:

Вес корпуса (включая конструктивное снабжение)	P_k
» механизмов	P_m
Судно легким	$P_s + P_k$
Чистая грузоподъемность	P_g
Топливо	P_t
Питательная вода	P_w
Масло	P_o
Ковшица с багажом	P_b
Патрульная и мыльная вода	P_{sw}
Давесит	P_{ds}
Знаки водоизмещения	P_z
Всего	Σ

При составлении нагрузки судна с его водоизмещением, найденным в первом приближении, обычно оказывается, что

$$D_1 \neq \Sigma$$

и, следовательно, количество груза, которое можно переместить на судне с найденными элементами, отличается от заданной грузоподъемности на величину

$$dP = D_1 - \Sigma.$$

В соответствии с этим находим коэффициент Нормана

$$\eta_n = \frac{1}{1 - \frac{P_k}{D_1} - \frac{2}{3} \left(\frac{P_m}{D_1} + \frac{P_g}{D_1} \right)}$$

и водоизмещение судна во втором приближении

$$D_2 = D_1 - dD = D_1 - \eta_n dP.$$

После определения коэффициента

$$\lambda_2 = \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{\frac{1}{3}}$$

главные размеры судна, его метacentрическая высота и мощность механизмов найдутся во втором приближении по формулам:

$$\frac{L_2}{L_1} = \frac{B_2}{B_1} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{H_2}{H_1} = \frac{N_2}{N_1} = \lambda_2;$$

$$\frac{N_2}{N_1} = \lambda_2^3$$

Коэффициенты теоретического чертежа, а также отношение h/B сохраняют прежние значения.

По элементам судна, полученным во втором приближении, можно составить новый вариант нагрузки. Расхождение между водоизмещением

$$D_2 = \gamma D_1 B_2 T_2$$

и новой суммой весов Σ оказывается обычно незначительным, что позволяет ликвидировать его путем изменения коэффициента общей полноты или запаса водоизмещения. В редких случаях может потребоваться дополнительное приближение, не предусмотренное в излагаемой схеме.

Третье приближение. Третье приближение можно посвятить выбору реальной механической установки. Для этого, исходя из элементов судна, найденных во втором приближении, необходимо прежде всего определить более точным способом сопротивление воды движению судна, например путем пересчета по прототипу с использованием подводящих данных из серийных испытаний моделей. После этого, исходя из предельного диаметра винта, соответствующего найденной осадке, выполняют предварительный расчет гребного винта, определяют полный пропульсивный коэффициент и необходимую мощность механизмов. Полученные данные используют для подбора подходящих главных двигателей, после чего производят повторный расчет гребного винта, исходя из фактической мощности и числа оборотов двигателей с тем, чтобы проверить их соответствие заданным. В этом же приближении целесообразно подобрать и вспомогательные механизмы, чтобы иметь возможность достаточно точно определить вес машинной установки.

Начиная с этого момента, веса механизмов, топлива, питательной воды и масла можно рассматривать как постоянные, а соответственно с чем уравнение весов упрощается и приводится к виду

$$D = \frac{P_k}{1 - \eta_n} = \frac{P_k}{1 - \frac{g_k}{\gamma^3} \frac{H}{T}} \quad (191)$$

где g_k — измеритель веса корпуса, относенный к кубическому модулю. Под P_k понимается сумма постоянных весов

$$P_k = P_m + P_{sw} + P_z.$$

Формулу (191) можно использовать для определения водоизмещения судна в третьем приближении. Если оно сравнительно мало отличается от водоизмещения, найденного во втором приближении, то новые главные размеры подсчитывают по формулам

$$\lambda_3 = \left(\frac{D_3}{D_2} \right)^{\frac{1}{3}};$$

$$\frac{L_3}{L_2} = \frac{B_3}{B_2} = \frac{T_3}{T_2} = \frac{H_3}{H_2} = \frac{N_3}{N_2} = \lambda_3.$$

В противном случае может оказаться необходимым дополнительно рассчитать нагрузку и скорость судна.

Четвертое приближение. Относим к четвертому приближению проверочные расчеты вместимости, дифферентовки и остойчивости в разных условиях нагрузки, а также соответствующую корректировку найденных ранее элементов, если это окажется необходимым. Полностью целесообразно уточнить минимальный предел отклонения высоты борта к осадке, исходя из правил о грузовой марке, и приблизительно проверить непотопляемость судна, если соответствующие требования предусмотрены заданием.

Приступая к этой работе, необходимо определять длину машинного отделения и измерять схему общего расположения судна, из которой показываются основные поперечные переборки, палубы, платформы и габаритные размеры надстроек.

Подсчитав расчетную длину надстроек, получим недостающие данные для определения минимального отношения H/T , соответствующего найденным в предыдущем приближении L , L/H и δ , по оригинальным правилам о грузовой марке или вспомогательным таблицам, приведенным в курсе [28].

Для проверки вместимости судна можно воспользоваться приближенными формулами или же построить предварительную эпюру емкости.

Если найденная удельная грузозаполняющая кубатура γ окажется меньше заданной, необходимо рассмотреть, как изменится на водоизмещение судна и его габаритных размерах различные возможные способы увеличения γ до заданного предела (уменьшение δ , увеличение L и H/T) и выбрать наиболее подходящее решение.

Для проверки остойчивости и дифферентовки необходимо составить таблицу нагрузки по укрупненным измерителям с указанием координат центров тяжести отдельных весов. Плечи весов снимаются со схемы общего расположения и эпюры емкости.

Таблица нагрузки используется для определения координат центра тяжести судна порожнем и в полном грузу. Если известны центры величины, замеченная с учетом требований гидромеханики, не совпадает с абсциссой центра тяжести судна в полном грузу, необходимо искать средства для достижения надлежащей удифферентовки. Обычно это удается сделать за счет соответствующего перемещения машинного отделения или изменения длины судна.

При проверке остойчивости судна в разных условиях нагрузки можно воспользоваться одним из приближенных способов построения кривой метастабилитетов.

Для приближенной оценки непотопляемости судна можно использовать диаграммы, предназначенные для построения приближенного графика предельных длин отсеков. Если непотопляемость судна не обеспечивается, эти диаграммы позволяют установить, каким образом следует изменить элементы судна для того, чтобы

оно удовлетворяло заданию. Основное значение имеют отношение H/T и осадочность.

Из изложенного следует, что проверочные расчеты, относимые к рассматриваемому этапу работы, позволяют приблизительно определить, каким образом нужно изменить длину судна, коэффициент общей волноты, отношение ширины к осадке или отношение высоты борта к осадке, если выбранные в предыдущем приближении соотношения элементов не обеспечивают выполнения каких-либо требований к вместимости, непотопляемости, удифферентовке, остойчивости или высоте надводного борта.

Исправленное в четвертом приближении подказначенное судна является по формуле (191).

Пятое приближение. Пятое приближение уместно посвятить в первую очередь уточнению нагрузки и координат центра тяжести судна. Для этого целесообразно использовать наиболее точные способы расчета нагрузки. Расхождение между суммой весов по нагрузке и водоизмещением, найденным в четвертом приближении,

$$dP = D_0 - \Sigma G_i,$$

устраняется способом, рекомендованным для второго приближения. Целесообразно использовать полученные результаты для уточнения показателя остойчивости и исправления удифферентовки.

При исследовании остойчивости судна нужно обратить внимание на возможное расположение кривых метастабилитетов и центров тяжести x , если это окажется целесообразным и возможным, исправить отношение B/T и коэффициент α с таким расчетом, чтобы значения метacentрической высоты в различных условиях нагрузки не выходили из намеченных пределов.

Для получения более точных результатов можно в этом приближении сделать набросок теоретического чертежа, не добиваясь особенно его согласованности. Не следует также добиваться, чтобы принятое в предыдущих приближениях значение коэффициента наклона грузовой ватерлинии было безусловно выдержано, если при проработке теоретического чертежа выявится целесообразность отступления от намеченной ранее цифры.

Предварительный теоретический чертеж используется для построения (по нескольким точкам) грузовой линии, кривой поперечных метacentрических радиусов и кривой ординат центров величины, а также для построения эпюры емкости и проверочных расчетов непотопляемости.

Если расчеты, соответствующие предыдущим приближениям, были выполнены достаточно точно и разумно, то и дополнительные проверочные расчеты пятого приближения обычно подтверждают, что требования, предъявленные к судну, выполнены.

К шестому приближению можно было бы отнести более углубленный анализ рассматриваемой задачи, при котором учитываются различные изменения соотношений главных размерений и коэффи-

ценностей теоретического чертежа на водонизмещение судна, мощность его механизмов и экономические показатели. Однако эту работу, выполняющуюся большой трудоемкостью, сравнительно редко выполняют в рядовых проектах, поскольку в большинстве случаев, базируясь на предшествующем опыте, можно в известной мере предсказать результаты подобного анализа. Поэтому его следует отнести скорее к разряду исследовательских работ, которые целесообразно приурочивать к типичным случаям практики для получения общих решений, охватывающих суда определенного типа. Для подобного анализа используется метод вариаций, изложенный ниже.

Рассмотренная схема, как отмечалось, представляет собой один из возможных вариантов решения задачи. В рамках этой схемы можно применить любые другие частные приемы, которые были изложены в предыдущих главах. Так, например, при определении водонизмещения судна в первом приближении можно было бы изменить ход решения задачи и воспользоваться уравнением весов, заданных в функции водонизмещения, или применить способ пересчета по протоплуну с помощью коэффициента Нормана. То же самое можно сказать и о последующих приближениях.

Естественно также, что в зависимости от специфики проекта и языков проектирования может меняться как содержание работ, приуроченных к тому или другому приближению, так и используемые расчетные формулы. В частности, например, рекомендуемые выше формулы для определения в первых приближениях коэффициента общей полноты и относительной длины относятся лишь к транспортным судам. При проектировании судов других типов вместо этих формул следовало бы воспользоваться данными по протоплуну или аналогичными практическими данными.

Не следует думать, что задача определения элементов проектируемого судна при любых обстоятельствах исчерпывается исследованиями, которые были выше описаны к пятому приближению. Целесообразность внесения некоторых изменений (обычно незначительных) в принятые ранее решения может возникнуть в процессе дальнейшей разработки проекта — после выполнения детальных расчетов или ознакомления опытных и исследовательских работ, если их выполняют параллельно с разработкой проекта. Таким образом, с более общей точки зрения весь процесс разработки проекта судна основывается на решении задачи в ряде приближений.

§ 2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ О МЕТОДЕ ВАРИАЦИЙ И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАИБОЛЕЕ ВЫГОДНЫХ СКОРОСТИ И ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ

Как уже отмечалось, метод вариаций применяется для выявления зависимости некоторых параметров, например водонизмещения, мощности механизмов, экономических показателей судна, а также показателей его остойчивости и непотопляемости от соотношений

главных размеров, коэффициентов теоретического чертежа и заданных характеристик судна. Чтобы судить о характере этих зависимостей, строят графики изменения исследуемых функций, которые, в частности, позволяют установить их экстремальные значения, если они имеются и если они попадают в область изменения элементов, имеющих практическое значение. При выборе подходящего решения наряду с водонизмещением судна, его габаритными размерами, мощностью механизмов и экономическими характеристиками, учитывают также показатели мореходных качеств.

Первая попытка применять метод вариаций при проектировании судов принадлежит Калло. В работе, опубликованной в 1902 г., он предложил определять длину и ширину проектируемого судна путем совместного решения уравнений весов и остойчивости исходя из ряда выбранных значений осадки. Конечная цель этого приема заключалась в определении комбинации элементов, удовлетворяющих условию минимального водонизмещения.

В работе [9] И. Г. Бубнов предложил пользоваться развитым и тем способом определения элементов судна для исследования влияния изменения его размеров на водонизмещение, стоимость и эксплуатационные расходы. В курсе проектирования кораблей [3] А. Н. Волжский развил идеи И. Г. Бубнова.

Задача, связанный с применением метода вариаций при определении элементов проектируемого судна, поставили также работы В. А. Наваннина, Д. В. Дорогоостяйского, Л. М. Ногина и других советских специалистов¹. За границей этому вопросу были посвящены работы Е. В. Левенса, Х. Шеклута и Х. Бендорфа, Н. П. Ланкин, В. С. Дорин и др. Применял метод вариаций для решения отдельных частных задач.

В настоящее время метод вариаций широко используется как для экономического обоснования скорости хода и грузоподъемности судна, так и при изучении влияния изменения элементов судна на его технико-экономические показатели.

Результаты, к которым приводит метод вариаций, зависят от постановки задачи, выбранной расчетной схемы, способов, при помощи которых определяются мощность механизмов и нагрузки сопоставляемых вариантов судна, предположений, принятых для оценки влияния условий плаванья. Так как в практике применения метода вариаций нет еще единообразия, вопрос о выборе обоснованной расчетной схемы и подходящих исходных допущений имеет большое значение.

Остановимся на вопросе о применении метода вариаций для определения наиболее выгодной скорости и грузоподъемности.

Допустим сначала, что линия, для которой предназначается проектируемая серия судов, будет полностью обеспечена грузами,

¹ См. также курс [26] и доклад Л. М. Ногина и Ю. Н. Позова на технико-экономической конференции ЛКН в 1962 г.

независимо от принятых значений грузоподъемности и скорости хода. Это равносильно допущению, что грузовой поток Q_g на линию, обслуживаемую судами, равен бесконечности.

Общий способ определения оптимальных значений v_m и P сводится к построению кривых

$$Q; k; q; \dots = f(v_m, P) \quad (192)$$

и определению положений экстремальных точек, при которых Q достигает максимума, а k и q — минимума. Обычно эта задача решается в предположении, что величины в правой части равенств (192) являются независимыми переменными.

Такое допущение не отличается строгостью. Действительно, при определенном мощностном механизме, соответствующий составленным вариантам судна, приходится задаваться значениями коэффициента δ и отношением L/B в зависимости от числа Фруда. Число же Фруда зависит от скорости и невязно от грузоподъемности судна, поскольку грузоподъемность является функцией главных размеров и коэффициента общей полноты.

Таким образом,

$$\delta; \frac{L}{B} = f(Fr) = f(v_m, P)$$

и, следовательно,

$$N; D; P_k; \dots = f(v_m, P, \delta, \frac{L}{B}, \dots).$$

Последняя формула показывает, что, строго говоря, экономические показатели судна следует выражать не формулой (192), а сложными функциями вида

$$Q; k; q; \dots = f(v_m, P, \delta, \frac{L}{B}, \dots), \quad (193)$$

в которых величинами правой части равенства связаны между собой дополнительными функциональными зависимостями (точки в левой и правой части формулы показывают, что в нее можно дополнительно включить любые другие технико-экономические показатели судна и соотношения элементов).

Из изложенного следует, что для выявления характеристик судна, наиболее выгодного в данных условиях эксплуатации, его элементы, скорость и грузоподъемность должны определяться совместно так, как это показано на численном примере в § 3 главы десятой. Отступления от этого правила являются источником погрешности, а в некоторых случаях могут привести к принципиальным ошибкам.

Отметим, что В. М. Векслер при решении задач о наиболее выгодной скорости хода исходил из формулы (192), но принимал в качестве дополнительного условия, что в пределах каждой группы

вариантов судов, отличающихся скоростью хода, водовытеснение судна принимает ряд частных значений. При $D = \text{const}$ грузоподъемность вариантов оказалась переменной величиной вследствие изменения веса механизма и топлива. Таким образом, вместо задачи о наиболее выгодных грузоподъемности и скорости хода рассматривалась задача о наиболее выгодных водовытеснении и скорости хода при переменной грузоподъемности судна. Влияние же изменения коэффициента общей полноты и соотношения главных размеров на скорость, водовытеснение и грузоподъемность не исследовалось.

Подробное вопрос о применении метода вариантов при постановке экономизации рассмотрен в § 5 в связи с задачей об определении оптимальных элементов судна.

При исследовании зависимостей (193) соответствующие варианты удобно разбивать на группы, в пределах которых

$$N; L; B; T = \text{const}, \quad (194)$$

и по каждой группе в отдельности рассматривать соотношения

$$Q; k; q; \dots = f(v_m, P, \delta). \quad (195)$$

Это не отражается на общности полученных результатов, так как, повторяя расчеты для другой мощности механизма и других главных размеров судна, нетрудно получить ряд решений, соответствующих различным значениям отношений L/B , B/T , H/T и в том числе удовлетворяющих требованиям к вместимости, непоглощаемости, остойчивости и другим качествам судна. Таким образом, предлагаемый способ, который излагается в дальнейшем способом постоянных главных размеров, вполне универсален и позволяет выявить любые из возможных решений поставленной задачи.

В пределах каждой группы вариантов, как это показано в главе десятой, оптимальные соотношения, устанавливаемые по ряду экономических критериев, можно выявить аналитически. При этом критерии, содержащие величины, которые выражаются в различных единицах, можно заменить критериями, не содержащими таких величин, что значительно упрощает решение задачи и позволяет избежать указанных ранее принципиальных трудностей. Отмеченные обстоятельства свидетельствуют о существенных преимуществах способа постоянных главных размеров. Ряд других преимуществ этого способа указан ниже.

Как отмечалось, формула (193) соответствует предположению, что $Q_g = \infty$. Часто, однако, приходится рассматривать грузовой поток, характерный для данной линии, как заданную величину, например, если ставится задача обеспечить потребностям товарищам ограниченное число населенных пунктов, тяготеющих к данному бассейну. Так как в этом случае $Q_g = \text{const}$, то при

определении экономических показателей судна следует исходить из числа судов

$$n_c = \frac{Q_2}{Q} = \frac{Q_2}{T_{\text{РП}}}$$

необходимых для обслуживания линии. В соответствии с этим для определения n_c следует задаться рядом значений грузоподъемности и скорости хода, после чего можно найти соответствующие им значения числа рейсов n , совершаемых судном за протяжении навигации, а также его провозную способность Q .

С этими оговорками формула (193) в качестве промежуточной остается в силе, если речь идет об определении провозной способности одного судна. Капитальные же затраты, себестоимость перевозки груза и ряд других показателей определяются на основе анализа работы всей серии судов.

§ 1. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ВАРИАЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОЕКТИРУЕМОГО СУДНА

Остановившись на трех характерных задачах, представляющих интерес при определении элементов проектируемого судна.

Задача 1. Найти наиболее выгодные значения коэффициента δ и отношения L/B (или откосоватости дельты L , а в некоторых случаях и других соотношений главных размеров) в предположении, что скорость и грузоподъемность судна, оговоренные в задаании, представляют собой величины, установленные лишь приближенно.

Принятое допущение позволяет изменять скорость и грузоподъемность в некоторых пределах, если это улучшает экономические показатели судна. Поэтому с формальной точки зрения настоящая задача отличается от задачи, рассмотренной в предыдущем параграфе, лишь тем, что различия сопоставляемых вариантов судна по грузоподъемности и скорости предполагаются незначительными. Таким образом, формула (193)

$$Q; k; \varphi; \dots = f\left(v_{\text{кр}}, P, \delta, \frac{L}{B}, \dots\right)$$

сохраняет свое значение и при новой постановке задачи.

Для выяснения ясности допущения, что формула применима к группе вариантов судна, отличающихся коэффициентом общей полноты, но имеющих одинаковые главные размеры и одинаковую мощность механизмов. В этом случае вариации мало отличаются друг от друга по экономическим показателям, притом исключительно вследствие незначительного изменения веса стального корпуса. Помимо с увеличением коэффициента общей полноты растет грузоподъемность судна, одновременно снижается его скорость. Провозная же способность и другие экономические показатели могут увеличиваться или уменьшаться в зависимости от того, какой из

отмеченных факторов будет иметь доминирующее значение в данном интервале изменения переменных.

Из изложенного следует, что функция

$$P; v_{\text{кр}}; Q; k; \varphi; \dots = f(\delta)$$

имеет экстремальные значения, характеризующие наиболее выгодные сочетания грузоподъемности, скорости хода и коэффициента общей полноты.

Как известно, при всех прочих одинаковых условиях, экономические показатели судна улучшаются с увеличением его грузоподъемности. Поэтому, если задача рассматривается при переменной грузоподъемности, оптимальные значения δ получаются более высокими, чем в случае $P = \text{const}$.

Как отмечалось в предыдущем параграфе, дополнительные расчеты, выполненные для нескольких сочетаний L, B, T , позволяют исследовать также зависимость экономических показателей судна от соотношений его главных размеров. Представление о наиболее выгодных сочетаниях коэффициента δ и соотношений главных размеров дает диаграмма, характеризующая законы изменения показателей:

$$P; v_{\text{кр}}; Q; k; \varphi; \dots = f\left(\delta, \frac{L}{B}, \dots\right)$$

Представляется рациональным применять метод вариаций в такой интерпретации, если вопрос об экономичности судна имеет доминирующее значение. Особенно обоснован такой подход к решению задачи при определении элементов судов, предназначенных для перевозки дешеских массовых грузов, а также в тех случаях, когда главные размеры судна ограничены навигационными условиями.

В рассматриваемом случае принятую постановку задачи в отношении грузоподъемности и скорости, которые не фиксируются, а определяются совместно с коэффициентом δ и соотношениями главных размеров, можно обосновать так.

Указывая в заданиях грузоподъемность устанавливается большей частью исходя из предполагаемых условий эксплуатации судна, а именно интенсивности грузовых погрузок, partialности груза и пр. При разработке заданий эти величины можно определять лишь приближенно. Также лишь приближенно можно оценить грузоподъемность судна в тех случаях, когда ее устанавливают как наибольшую возможную, исходя из навигационных ограничений осадки, длины, а иногда и ширины судна. Действительно, при ограничении одного или нескольких главных размеров для определения максимальной достижимой грузоподъемности нужно задаться коэффициентом общей полноты судна и остальными главными размерениями. Однако элементы судна, принятые при разработке заданий, обычно отличаются от элементов, фиксируемых после детальной проработки проекта.

Нет также оснований считать строго фиксированной и скорость хода, если при составлении заданий ее определяли экономическими расчетами, а при разработке проекта выявлялась возможность более выгодного решения.

Задача 2. Определять наиболее выгодные сочетания элементов судна в предположении, что скорость, указанную в заданиях, нельзя снижать, а грузоподъемность задана приближенно.

Актуальность такой постановки задачи обуславливается тем, что скорость хода, указанная в заданиях, не всегда устанавливается исходя из экономических соображений и не всегда соответствует экономическому характеру задания отображать в нем конкретные критерии. Поэтому заданная скорость хода часто заведомо превосходит скорость, которую можно обосновать обычными экономическими расчетами.

При установлении «выгодных» скоростей хода принимают во внимание потребность народного хозяйства в морских перевозочных средствах, общую тенденцию повышения скоростей мирового судо-грузного и паливного флота, перспективы развития народного хозяйства, требования престижа и т. п. При проектировании судов заграничного плавания естественно учитывать, что избыточная мощность (по сравнению с мощностью, вытекающей из экономических расчетов) улучшает конкурентную способность судна, так как позволяет увеличить скорость хода с учетом фрахтовой комплектации. Это имеет существенное значение, поскольку при высоких фрахтах выгодно увеличивать скорость хода для повышения доходности судна.

В капиталистических странах одним из важнейших критериев при оценке экономичности судна признается ожидаемая прибыль. Этот критерий приводит к более высоким «оптимальным» скоростям хода, чем себестоимость перевозки груза. Однако наиболее существенным стимулом для наращивающегося в капиталистических странах, особенно в США, повышения скоростей хода грузовых судов являются предположения об их использовании в военное время. Они приводят к субсидированию государством постройки и эксплуатации судов, удовлетворяющих требованиям военно-морских учреждений.

При $v_{\text{кр}} = \text{const}$, $P \neq \text{const}$ рассматриваемая задача сводится к последовательной зависимости

$$N; Q; K; q; \dots = f\left(P, k, \frac{L}{B}\right), \quad (196)$$

которые подобно зависимостям (195) также представляют собой сложные функции от величин, стоящих вправо от знака равенства. Для групп вариантов, отличающихся коэффициентом обшей полноты и удовлетворяющих условиям $L, B, T = \text{const}$, увеличение коэффициента δ приводит к возрастанию мощности металлов. Одновременно увеличивается грузоподъемность судна, однако мед-

леннее, чем в предыдущих случаях, когда для каждой группы вариантов было принято $N = \text{const}$.

Вследствие отмеченных обстоятельств, если все прочие условия одинаковы, кривые экономических показателей судна, вычисленные при $N = \text{const}$ и $v_{\text{кр}} = \text{const}$, будут отличаться положением экстремальных точек. Во втором случае они смещаются в сторону меньших коэффициентов обшей полноты, если основные варианты судна имеют одинаковую мощность и скорость.

В некоторых работах (В. М. Векслера — в Советском Союзе, Х. Вейдлер — в США) поставленная задача решается в предположении, что водозащещение сопоставляемых вариантов судна сохраняется неизменным¹. Условие $D = \text{const}$ приводит к равенству $L/B T = \text{const}/\delta$. Поэтому при $L/B; B/T \dots = \text{const}$ главные размеры сопоставляемых вариантов судна изменяются обратно пропорционально корню кубическому из коэффициента обшей полноты. Число Фруда также перестает быть постоянной величиной и изменяется от варианта к варианту обратно пропорционально $\delta^{1/3}$. Таким образом, мощность механизмов изменяется теперь не только в зависимости от параметров, характеризующих форму судна, но и в зависимости от числа Фруда.

Из формулы

$$\frac{L}{D^{1/3}} = \left[\frac{1}{\gamma^3} \left(\frac{L}{B} \right)^3 \frac{B}{T} \right]^{1/3}$$

следует, что при $\delta = \text{const}$ изменение отношения L/B или B/T также сопряжено с изменением длины судна и числа Фруда.

Таким образом, при любых расчетных предположениях нельзя в чистом виде (т. е. при $F_r = \text{const}$) выделить влияние формы судна на сопротивление воды. Кроме того, вследствие изложенных ранее обстоятельств осложняется и становится менее точным расчет стоимости рассматриваемых вариантов судна.

Сопоставляя обе расчетные схемы, следует также учесть, что главные размеры судна, и в первую очередь длина и осадка, являются величинами, существенно влияющими на условия эксплуатации. Водозащещение же — техническая характеристика, которая сама по себе не представляет интереса для организаций, эксплуатирующих флот.

Отмеченные достоинства и недостатки рассматриваемых схем имеют существенное значение. Важнее все же то, что при одном и том же исходном протоколе они приводят к различным результатам и, вероятно, решая задачу в предположении, что $D = \text{const}$, мы будем получать меньшие значения оптимального коэффициента δ , чем при $L, B, T = \text{const}$. В соответствии с этим оптимальный за-

¹ Впервые этот способ был применен на Адмиралтейском заводе.

риант судов с одинаковым водоизмещением будет отличаться меньшей мощностью механизмов, а оптимальный вариант судов с одинаковыми главными размерениями — меньшими габаритами и более легким корпусом.

Неоднозначность полученных результатов объясняется тем, что любые уравнения, которые, наряду с уравнением песса, могут быть использованы в методе вариаций, в частности условия $D = \text{const}$ и $L, B, T = \text{const}$, являются дополнительными связями. Они приводят к тому, что из всех возможных комбинаций, удовлетворяющих условиям задачи, подвергается анализу лишь определенное сочетание. Ряд же возможных решений остается необследованным.

Для получения исчерпывающих результатов следовало бы решить задачу, задаваясь рядом водоизмещений или достаточно большим числом сочетаний главных размерений, чтобы можно было с исчерпывающей полнотой исследовать влияние изменения грузоподъемности судна. В этом случае оба способа будут приводить к идентичным результатам при сопоставлении судов с одинаковой грузоподъемностью.

Вследствие большой трудоемкости подобных расчетов обычно оба способа применяются в сокращенном объеме. Уменьшая число вариаций в способе постоянных главных размерений, целесообразно подбирать неследующие комбинации $L, B, T = \text{const}$ так, чтобы основные варианты каждой группы, отличающиеся друг от друга проведением главных размерений, характеризовались бы одинаковой грузоподъемностью и одинаковым коэффициентом общей полноты. Для второго из сопоставляемых способов равносильное упрощение сводится к решению задачи при одном из всех исследуемых вариантов водоизмещения. Какая из этих двух упрощенных схем и при каких условиях приводит к оптимальному варианту с более высоким показателем, пока еще неясно.

Задача 3. Определить наиболее выгодное сочетание элементов судна в предположении, что его грузоподъемность представляет собой строго заданную величину. Заданной величины следует также считать либо скорость хода либо мощность механизмов.

В этом случае нет основания для применения способа постоянных главных размерений и задача сводится к исследованию функциональных зависимостей

$$\begin{aligned} D; N; k; \varphi; \dots &= f\left(\delta, \frac{L}{B}, \dots\right) \text{ при } v_{\text{из}} = \text{const}; \\ D; v_{\text{из}}; k; \varphi; \dots &= f\left(\delta, \frac{L}{B}, \dots\right) \text{ при } N = \text{const}. \end{aligned} \quad (197)$$

Такая постановка задачи представляется обоснованной в тех случаях, когда элементы судна определяются условиями, не связанными с весовыми соотношениями.

Сказанное можно пояснить на примере небольших промысловых судов, отличающихся малыми коэффициентами общей полноты

$\delta = 0,35-0,55$. Эти цифры обусловлены не требованиями, предъявляемыми к ходовым качествам судна, которым можно было бы удовлетворить и при более высоких значениях коэффициента δ , а необходимостью обеспечить надлежащую остойчивость судна и вместимость грузовых трюмов. Для выделенных же грузовых трюмов с нужной кубатурой габаритные размеры судна должны быть достаточно большими. Подходящие соотношения получаются при малых коэффициентах δ , позволяющих одновременно обеспечить остойчивость судна.

Поэтому в рассматриваемом случае возрастание грузоподъемности судна сверх заданной путем уменьшения коэффициента δ при $L, B, T = \text{const}$ не оправдалось бы, так как дополнительную плавучесть нельзя было бы использовать вследствие недостатка кубатуры.

Так же обстоит дело со многими судами вспомогательного и технического флота (буксираторы, гидрографические судами, доками и т. п.), а также пассажирскими судами. Главные размерения последних определяются в основном условиями размещения помещений и требований, предъявляемых к остойчивости, непотопляемости и ходкости судна.

Общие выводы. Из предыдущего следует, что коэффициент общей полноты и соотношения главных размерений в формулу (197) являются независимыми переменными. Этим формулы (197) отличаются от формул (193) и (196), в которых величинами правой части являются, а именно $v_{\text{из}}, P, \delta, L/B$ — в первом случае и $P, \delta, L/B$ — во втором случае, связанными дополнительными функциональными зависимостями. Как отмечалось, вследствие различной математической природы сопоставляемых формул они в общем случае приводят к неодинаковым результатам.

Остановимся на частных случаях, в которых результаты не зависят от постановки задачи.

Пусть при заданной мощности механизмов скорость хода и грузоподъемность судна соответствуют оптимальному сочетанию этих величин. В этом случае, при всех прочих динамических условиях, расчеты по формулам (193) и (196) приводят к идентичным выводам. Действительно, если одна из вариантов группы судов с одинаковыми главными размерениями соответствует заданному сочетанию скорости и грузоподъемности, которое является наиболее выгодным, то любое изменение коэффициента общей полноты в большую или меньшую сторону неизбежно приводит к ухудшению технико-экономических показателей судна.

То же самое можно сказать о варианте судна, элементы которого соответствуют абсолютному optimum, установленному после рассмотрения нескольких групп вариантов, отличающихся мощностью механизмов и соотношениями главных размерений.

Допустим теперь, что скорость хода, соответствующая варианту, который рассматривается как основной, не равна оптимальной ско-

рости (для определенности будем считать, что она превышает оптимальную). Тогда, увеличив коэффициент полноты, можно повысить экономичность судна, хотя это приводит к уменьшению скорости хода. Возможно, что при сниженной скорости те же или лучшие результаты можно получить путем уменьшения мощности механизмов без увеличения коэффициента k . Все же в этом случае сохраняется возможность повторного улучшения экономических показателей судна путем нового увеличения коэффициента k . Такой способ улучшения экономичности судна нельзя использовать после того, как скорость судна становится наиболее выгодной при наиболее выгодном сочетании мощности, грузоподъемности и элементов судна.

На практике метод вариаций в постановке, соответствующей задаче 3, т. е. при $P; v_{\text{кр}} = \text{const}$ или $P; N = \text{const}$, применяется не только в тех случаях, когда весовые соотношения не имеют доминирующего значения, но и при определении элементов сухогрузных и наливных судов. В этом случае он превращается в относительно громоздкий способ совокупного решения уравнений, определяющих элементы судна, который используется в предположении, что произвольные параметры уравнений теории проектирования судов принимают ряд частных значений. Он приводит к надоедливому результату (см. § 6) после выделения области сочетаний элементов судна, удовлетворяющих требованиям, не получившим непосредственного отражения в уравнениях веса и мощности, например заданным показателям вместимости и остойчивости, ограничениям главных размеров и т. п.

Такую задачу можно решить и более простыми средствами, однако результаты получаются в менее наглядной форме.

§ 6. ВАРИРУЕМЫЕ СООТНОШЕНИЯ. ПОСТРОЕНИЕ ИЗОЛИНИЙ

Существует мнение, что метод вариаций более прогрессивен, чем другие, и поэтому должен при любых условиях применяться для определения элементов проектируемого судна. Это дает основание подробнее остановиться на вопросе об условиях, при которых целесообразно применять метод вариаций, и связанным с ним вопросом о выборе соотношений, задаваемых в ряде вариантов. Для определенности допустим, что речь идет о расчете элементов небольшого промыслового судна активного лова.

Как показывают опыт проектирования подобных судов, они достаточно мореходны, если (при сравнительно низком положении центра тяжести судна) их метacentрическая высота приближается к минимуму, достаточному для обеспечения безопасности плавания. С другой стороны, для облегчения промысловой работы целесообразно проектировать рыболовные суда с минимальным надводным бортом, признаваемым достаточным для того, чтобы избежать чрезмерной зализанности и обеспечить достаточную остойчивость судна при больших углах наклонения. Установлено также, что увеличе-

ние вместимости трюмов сверх заданной большей частью нецелесообразно, так как приводит к возрастанию размеров судна и ухудшению его экономических показателей.

В соответствии с изложенным во многих случаях для определения семи искоемых неизвестных $\delta, \alpha, \varphi, L, B, T, H$ можно использовать уравнения веса, остойчивости, вместимости, надводного борта (в виде отношения $\frac{H}{T} = \text{const}$) и зависимости $\varphi = f(\delta)$, $\alpha = f(\varphi)$. Часто можно принять также $L = \text{const}$, так как наиболее выгодной оказывается минимальная длина судна, необходимая для размещения появлений j устройств.

В подобных случаях задачу можно решить однозначно, в связи с чем отпадает потребность в использовании метода вариаций. Так же обстоит дело и с другими судами, если для определения их элементов можно выделить достаточное число уравнений и выразить имеющиеся в них произвольные параметры конкретными цифрами. Накопление необходимых данных, позволяющее конкретизировать произвольные параметры, является одной из важнейших задач теории проектирования судов.

Возвращаясь к рассматриваемому примеру, допустим, что некоторые из отмеченных уравнений, например уравнения остойчивости и вместимости, рассматриваются как неравенства, характеризующие допустимые пределы изменения относительной метacentрической высоты и удельной вместимости. Тогда, приняв

$$\frac{A}{B} = \left(\frac{A}{B}\right)_1; \left(\frac{A}{B}\right)_2; \left(\frac{A}{B}\right)_3; \dots;$$

$$P = P_1; P_2; P_3; \dots;$$

нетрудно найти ряд сочетаний элементов судна, соответствующих рассматриваемым сочетаниям A/B и P , и выделить решения, которые представляются наиболее выгодными исходя из всей совокупности требований, предъявляемых к судну. Вместо выделенных показателей можно задать в ряде вариантов, как это делалось ранее, какие-либо соотношения элементов судна. Этот путь — единственный правильный, если относительная метacentрическая высота, входящая в уравнение остойчивости, должна обеспечивать выполнение ряда требований, предъявляемых к судну, например в отношении периода свободных поперечных колебаний $T_{\text{п}}$, угла крена на циркуляции $\theta_{\text{ц}}$, угла крена от скопления пассажиров на одном борту $\theta_{\text{п}}$, угла крена $\theta_{\text{с}}$, вызванного несимметричным затоплением отсеков, и т. п. В подобных случаях уравнения вместимости и остойчивости

$$\left. \begin{aligned} \mu &= f\left(\delta; \frac{L_{\text{в}}}{L}; \frac{H}{T} \dots\right); \\ \frac{B}{T} &= f\left(\frac{\delta}{B}; \delta, \alpha, \frac{H}{T}\right); \end{aligned} \right\} \quad (198)$$

где N — мощность главных двигателей, n_g — число оборотов гребного вала.

В первом случае, имеющем более общее значение, для каждого варианта судна принимается машинная установка с мощностью, равной теоретически необходимой мощности, и с наиболее подходящим числом оборотов, ограничиваемым лишь осадкой судна и обусловленным ею диаметром вала. В соответствии с этим коэффициент полезного действия вала меняется довольно значительно от варианта к варианту. В относительно широких пределах изменяются также водоизмещение и мощность механизмов. Преимущество получают варианты судов с большой осадкой (малыми L/B и σ).

Во втором случае исходит из реального двигателя с присущим ему числом оборотов. Поэтому для всех вариантов коэффициент полезного действия вала остается приблизительно одинаковым. При такой постановке задачи, которая представляется естественной в тех случаях, когда метод вариаций используется в конкретном проекте (а не для общего исследования вопроса), отдельные варианты судна меньше отличаются друг от друга по водоизмещению.

Можно, наконец, исходить из предположения, что переменная машинной является мощность механизмов, но условно считать коэффициент полезного действия вала величиной постоянной. Это допущение, соответствующее приблизительно действительным условиям, если $n_g = \text{const}$, сближает пределы колебаний водоизмещения и мощности механизмов по сравнению с первым из рассмотренных случаев. Поэтому результаты подобного исследования меньше отличаются от результатов, которые могут быть получены в предположении, что мощность механизмов остается неизменной.

В любом из отмеченных случаев, если требуется оценить экономические показатели вариантов судна, строятся кривые

$$q; k; \dots = f\left(i, \frac{L}{B}\right).$$

Кроме того, если $N = \text{const}$, варианты судна соотносятся по провальной способности (при $v_{\text{max}} = \text{const}$ и $Q = \text{const}$). Строится также кривая, выражающая технико-экономический показатель судна, например

$$N; \mu; \frac{b}{\sigma}; \dots = f\left(i, \frac{L}{B}\right).$$

и, если имеются ограничения по длине или осадке судна, кривые

$$L; T = f\left(i, \frac{L}{B}\right).$$

Расчеты, связанные с определением элементов судна в ряде вариантов при помощи уравнения веса, выраженных в функциях главных размеров судна, отличаются большой трудоемкостью. Применяя для решения этой задачи способ постоянного водоизмещения, можно значительно упростить выкладки.

Предлагаемый способ [28] заключается в том, что в первом приближении принимаются

$$D = D_0 = \text{const},$$

где D_0 — водоизмещение исходного (основного) варианта судна. Это упрощающее допущение позволяет определить элементы сопоставляемых вариантов, используя уравнение плавучести и часть зависимостей (300). После этого для каждого варианта судна можно подсчитать соответствующую ему мощность механизмов (или скорость хода), составить таблицу нагрузок и найти недостающие и избыточные веса

$$dP = D_0 - \Sigma,$$

где Σ — сумма всех весов по нагрузке. Дальнейший ход решения задачи сводится к определению коэффициентов Нортона, применяя уравнение

$$dD = \gamma_d dP$$

и исправленных водоизмещений

$$D = D_0 + dD.$$

После этого остается найти исправленные главные размерения вариантов судна приемом, который уже применялся ранее в способе последовательных приближений. Как правило, решение, полученное во втором приближении, оказывается достаточно точным, вследствие чего отпадает необходимость в третьем приближении.

В рассматриваемом случае (т. е. при $\frac{B}{T} = \text{const}$; $\frac{H}{T} = \text{const}$) расчет может быть оформлен в соответствии с табл. 35.

Если предполагается использовать полученные результаты для экономических расчетов, нужно дополнительно исправить веса, входящие в нагрузку вариантов судна. При этом можно воспользоваться простейшими способами пересчета весов. В качестве примера приводим формулы

$$P_{\text{ст}} = (P_{\text{ст}0})^{1.2}; P_{\text{ос}} = (P_{\text{ос}0})^{1.2}; P_{\text{ж}} = (P_{\text{ж}0})^{1.2}.$$

Применяя способ вариаций в рамках первого приближения, т. е. ограничиваясь вычислением в табл. 35 переменных значений грузоподъемности $P = D_0 - \Sigma$, мы приходим к способу вариаций при $D = \text{const}$, охарактеризованному ранее в § 5.

В табл. 36 и 37 приведены расчетные схемы для определения сопротивления и мощности механизмов сопоставляемых вариантов. Первая из них соответствует одному из рассматриваемых значений коэффициента $\lambda = \lambda_1$ к ряду значений отношения L/B . По приведенной схеме вначале подсчитывается буксирное сопротивление, соответствующее нескольким выбранным значениям скорости на испытаниях $v_{\text{в}}$ и числам Фруда $Fr_{\text{в}}$. После определения эксплуатационной скорости $v_{\text{эк}} = v_{\text{в}} - \Delta v$, где Δv — приток скорости

Таблица 35
Определение элементов судна способом постоянного водоизмещения

Величины	$\delta = \delta_1$			$\delta = \delta_2$		
	$\left(\frac{L}{B}\right)_1$	$\left(\frac{L}{B}\right)_2$	$\left(\frac{L}{B}\right)_3$	$\left(\frac{L}{B}\right)_1$	$\left(\frac{L}{B}\right)_2$	$\left(\frac{L}{B}\right)_3$
$L_0 = D_0^{1/3} \left[\frac{1}{\gamma^3} \left(\frac{L}{B} \right)^3 \frac{B}{T} \right]^{1/3}$						
$B_0 = \frac{B}{L} L_0$						
$T_0 = \frac{T}{B} B_0$						
$H_0 = \frac{H}{T} T_0$						
N_0 (из табл. 37)						
P_1						
P_2						
P_3						
Σ						
$dP = D_0 - \Sigma$						
$dD = \gamma_{00} dP$						
$D = D_0 - dD$						
$\lambda = \left(\frac{D}{D_0} \right)^{1/3}$						
$N = N_0 \lambda^3$						
$L = L_0 \lambda$						
$B = B_0 \lambda$						
$T = T_0 \lambda$						
$H = H_0 \lambda$						

в реальных условиях плавания, строятся кривые $R = f(v_{00})$. Эти кривые позволяют определить буксировочное сопротивление парантов судна, соответствующее заданной эксплуатационной скорости.

По найденным значениям R и σ_{00} мощность механизмов определяется так, как это показано в табл. 37, составленной в предположении, что в каждом рассматриваемом случае мощность механизмов равна теоретически необходимой мощности двигателей при наиболее подходящем числе оборотов гребного вала. Это число оборо-

Таблица 36
Определение сопротивления воды

Величины	$\delta = \delta_1$			$\delta = \delta_2$		
	$\frac{L}{B} = \left(\frac{L}{B} \right)_1; L = L_1$	$\frac{L}{B} = \left(\frac{L}{B} \right)_2; L = L_2$	$\frac{L}{B} = \left(\frac{L}{B} \right)_3; L = L_3$			
v_0						
P_0						
R						
$\Delta \sigma$						
σ_0						
$\Delta \sigma$						
$\sigma_{00} = \sigma_0 - \Delta \sigma$						

Таблица 37
Определение мощности механизмов

Величины	$\delta = \delta_1$			$\delta = \delta_2$		
	$\left(\frac{L}{B} \right)_1$	$\left(\frac{L}{B} \right)_2$	$\left(\frac{L}{B} \right)_3$	$\left(\frac{L}{B} \right)_1$	$\left(\frac{L}{B} \right)_2$	$\left(\frac{L}{B} \right)_3$
v_{00}						
R						
σ						
ϵ						
$v_{00} = \frac{1 - \epsilon}{1 - \sigma}$						
$P = \frac{R}{1 - \epsilon}$						
$v_{00} = (1 - \sigma) v_{00}$						
$d = \sigma T$						
N						
$\gamma_{00} = \gamma_{00} \gamma_{00}$						
γ_{00}						
$N = \frac{P \gamma_{00}}{\gamma_{00}} \frac{1}{\gamma_{00}}$						

тов определяется исходя из допущения, что диаметр явнта ограничивается лишь принятым соотношением $a = \frac{d}{T}$. При v_0 в таблице принимается суммарный пропульсивный коэффициент, учитывающий заряду с гидродинамическими факторами механические потери.

Если мощность механизмов рассматривается как заданная величина, кривые $R = f(v_{0a})$ используются для определения мощности

$$N = \frac{P}{\eta_a} = \frac{R v_{0a}}{\eta_a} \frac{1}{v_a}$$

в функции эксплуатационной скорости и для построения соответствующего графика, который позволяет определить эксплуатационные скорости вариантов судна, соответствующие заданной мощности механизмов.

Остановимся теперь на случаях, когда заряду с уравнением несс используются уравнения остойчивости к наводного борта.

Допустим начало, что исходя из требований, предъявляемых к судну (например к его аварийной остойчивости или мореходности), была установлена зависимость

$$\frac{h}{B} = f\left(\frac{L}{B}, \frac{B}{T}, \frac{H}{T}, \dots\right),$$

позволяющая дополнительно использовать уравнение остойчивости

$$\frac{B}{T} = f\left(\frac{h}{B}, \frac{L}{B}, \frac{H}{T}, \dots\right). \quad (201)$$

Пусть, кроме того, $\frac{H}{T} = \text{const}$. Тогда после заполнения в табл. 35 строки 2 следует подсчитать значения отношения B/T по формуле (201).

Столь же просто решается задача, если при $\frac{B}{T} = \text{const}$ отношение H/T , в соответствии с правилами о грузовой марке, выражается зависимостью

$$\frac{H}{T} = f\left(\frac{L}{B}, \frac{L}{H}, \frac{L}{T}\right). \quad (202)$$

Если требуется одновременно удовлетворять зависимостям (201) и (202), то в первом приближении можно принять

$$\frac{B}{T} = \left(\frac{B}{T}\right)_0 = \text{const},$$

где $\left(\frac{B}{T}\right)_0$ — отношение ширины судна к осадке, найденное способом последовательных приближений для основного варианта судна.

Это допущение позволяет определить главные размерения вариантов судна L_0, B_0, T_0 , а затем в соответствии с зависимостями (202) — отношение H/T . После этого остается найти во втором приближении отношение B/T и газиме размерения вариантов судна, соответствующие принятым значениям H/T и L/B . Обычно не возникает необходимости в уточнении полученных результатов в третьем приближении.

5. ПРимеры использования уравнения остойчивости в методе вариаций

В предыдущем параграфе мы использовали уравнение остойчивости в предположении, что отношения h/B и H/T могут быть выражены однозначно в функции от элементов судна. Рассмотрим этот вопрос с более общим аспектом, предполагая, что нам известна ряд уравнений вида

$$\left(\frac{h}{B}\right)_i = f_i\left(\frac{L}{B}, \frac{B}{T}, D, \dots\right), \quad (203)$$

связывающих относительную метакентровую высоту с некоторыми мореходными качествами судна, например кренком свободной поперечной качкой, углом крена на циркуляции и др. Кроме того, будем считать известными также уравнения наводного борта

$$\left(\frac{H}{T}\right)_j = f_j\left(\frac{L}{B}, \frac{L}{H}, \frac{B}{T}, \frac{h}{B}, \dots\right), \quad (204)$$

которые связывают отношение H/T с некоторыми, характеризующими мореходные качества судна (например, непотопляемость, аварийную остойчивость, остойчивость при больших углах крена), или же вытекают из кривых, регламентирующих судостроение.

При принятых допущениях открываются возможности использовать дополнительно уравнения полнучести и остойчивости

$$D = D_0 = \gamma L B T = \text{const};$$

$$\frac{D^3}{T^3} = \frac{1}{\eta_a} \frac{h}{B} \frac{B}{T} - \frac{\eta_a}{T} + \frac{h}{\eta_a} \frac{H}{T}.$$

Приним, кроме того,

$$a = f(b);$$

$$b = b_1, b_2, b_3, \dots$$

$$\frac{L}{B} = \left(\frac{L}{B}\right)_1, \left(\frac{L}{B}\right)_2, \left(\frac{L}{B}\right)_3, \dots$$

получаем семь уравнений, с помощью которых можно определить семь неизвестных

$$L, a, D, \frac{L}{B}, \frac{B}{T}, \frac{H}{T}, \frac{h}{B}.$$

Погрешности, вытекающие из допущения о постоянности пропорциональности, легко устраняются после определения итерационных размерений судна способом постоянного мореходности.

Расчеты, связанные с определением отношений H/T , могут быть сведены в табл. 36, составленную для одной пары уравнений (203) и (204). Если

число вариантов по отношению L/B рассматриваются варианты по относительной длине L , эта таблица заменяется табл. 33. Последнее дано для случая, когда коэффициент α определяется в зависимости от коэффициента продольной обтекаемости Φ Фруда.

В качестве примера рассмотрим задачу об определении граничных значений отношения B/T при $D=const$, исходя из требований, предъявля-

Таблица 35

Определение относительной $\frac{B}{T}$ в функции ξ и $\frac{L}{B}$ при $D=const$

Данные и показатели судна	$\left(\frac{L}{B}\right)_1$			$\left(\frac{L}{B}\right)_2$			$\left(\frac{L}{B}\right)_3$		
	λ_1	λ_2	λ_3	λ_1	λ_2	λ_3	λ_1	λ_2	λ_3
$\alpha = f(\Phi)$ $\eta = f(\alpha, \Phi)$ $\eta_0 = f(\eta, \Phi)$									
$\left(\frac{B}{T}\right)_1 = F_1\left(\lambda, \frac{L}{B}, \frac{B}{T}\right)$									
$\left(\frac{B}{T}\right)_2 = F_2\left(\lambda, \frac{L}{B}, \frac{B}{T}\right)$									
$\left(\frac{B}{T}\right)_3 = F_3\left(\lambda, \frac{L}{B}\right)$									

Таблица 39

Определение относительной $\frac{B}{T}$ в функции ξ и i при $D=const$

Данные	ξ			i			ξ		
$\xi = \frac{L}{B} \frac{B}{T}$ $\eta = f(\xi)$ $\eta_0 = f(\eta)$ $\alpha = f(\eta, \Phi)$	λ_1	λ_2	λ_3	λ_1	λ_2	λ_3	λ_1	λ_2	λ_3
Показатели	λ_1	λ_2	λ_3	λ_1	λ_2	λ_3	λ_1	λ_2	λ_3
$\eta = f(\xi, \Phi)$ $\eta_0 = f(\eta, \Phi)$									
$\left(\frac{B}{T}\right)_1 = F_1\left(\lambda, \frac{L}{B}, \frac{B}{T}\right)$									
$\left(\frac{B}{T}\right)_2 = F_2\left(\lambda, \frac{L}{B}, \frac{B}{T}\right)$									
$\left(\frac{B}{T}\right)_3 = F_3\left(\lambda, \frac{L}{B}\right)$									

емых к максимальному углу крена судна на циркуляции η' и его минимальному переку η_0 свободной поперечной килевой 1 .

Допустим, что при определении элементов судна для исходного варианта проекта были зафиксированы следующие значения, которые рассматриваются в дальнейшем как постоянные:

$$\begin{aligned} V &= 3000 \text{ м/ч}; & \gamma &= 0,63; \\ n &= 18 \text{ а/сек}; & \alpha &= 0,72; \\ \frac{n}{T} &= 1,8; & \xi &= 0,7. \end{aligned}$$

Примем, кроме того,

$$\begin{aligned} \eta'_{\max} &= 12'; \\ (\eta_0)_{\min} &= 10 \text{ сек.} \end{aligned}$$

и рассмотрим задачу при $i = 0,48; 0,50; 0,52; 0,54$ и $\xi = 8,0; 8,5; 9,0$.

Выражение относительной метанетрической высоты, соответствующей предельному углу крена на циркуляции, может быть представлено в виде

$$\frac{h}{B} = 0,7 \frac{n^2}{V^3} \frac{T}{B} \left(2\xi \frac{n}{T} - 1 \right) \frac{1}{\eta'_{\max}}. \quad (365)$$

При приведенных выше исходных данных

$$\frac{h}{B} = \frac{2,63}{i} \frac{T}{B}.$$

Для среднего значения относительной длины $i = 8,5$ соответствующие значения относительной метанетрической высоты найдутся из соотношения

$$\frac{h}{B} = 0,309 \frac{T}{B}. \quad (366)$$

После подстановки в уравнение остойчивости

$$\eta_0 \frac{B^3}{T^3} = \frac{h}{B} \frac{B}{T} - \eta_0 + \xi \frac{n}{T}$$

значений $\frac{h}{B}$, ξ и $\frac{n}{T}$ оно переписывается следующим образом:

$$\frac{B^3}{T^3} = \frac{1,50 - \eta_0}{\eta_0}. \quad (367)$$

Формула (367) позволяет определить отношение $\frac{B}{T} = \left(\frac{B}{T} \right)_{\min}$, при котором угол крена на циркуляции не превышает отклоненного угла $\eta_0 = 12'$. Соответствующие расчеты сведены в табл. 42, в которой циркуля со значениями $\left(\frac{B}{T} \right)_{\min}$ указаны значения относительной метанетрической высоты, рассчитанные по формуле (366).

¹ Выход формула, использованных при преобразовании уравнения остойчивости, приведен в § 8 главы седьмой.

Таблица 40

Численные значения отношения $\frac{B}{T}$ к $\frac{h}{B}$ при $l = 8,5$

Показатели	$l = 0,45$	$l = 0,50$	$l = 0,55$	$l = 0,58$
$\tau_0 = 0,5 \left(\frac{h}{B} \right)^{1/2}$	3,603	0,691	0,589	0,578
$\tau_0 = \frac{1}{11,5} \frac{h^2}{B}$	3,080	0,690	0,586	0,5815
$\left(\frac{B}{T} \right)^{1/2} \min = \frac{0,30 \cdot \tau_0}{\tau_0}$	9,47	10,98	13,30	17,66
$\left(\frac{B}{T} \right)^{1/2} \min$	2,67	3,36	3,24	3,20
$\frac{h}{B} = 0,308 \frac{T}{B}$	0,077	0,077	0,077	0,075

Полученные цифр могут быть легко исправлены с учетом значительных поправок, полученных во втором приближении, если для определения поправки применяется способ постоянного водоизмещения.

Можно отказаться от уточнения значений B/T для других рассматриваемых данных, поскольку дополнительные расчеты привели бы к цифрам, несущественно отличающимся от цифр, полученных в случае, когда $l = 8,5$.

Проверим теперь полученные значения отношения B/T по порядку свободных поперечных колебаний судна, отбрасывая рассматриваемый вариант, соответствующий предельным значениям коэффициента обшивки $\phi = 0,45$ и $\phi = 0,64$. Для этого воспользуемся тождествами

$$\frac{1}{B} = \left(2\pi \frac{T}{B} \right)^{1/2}, \quad B = 19 \frac{1}{L} \frac{B}{L}$$

в формулы

$$\tau_0 = 0,308 \frac{B}{V \lambda} = 0,308 \sqrt{\frac{B}{B/L}} \quad (208)$$

Таблица 41

Определение периодов свободных поперечных колебаний корабля

Показатели	При $l = 0,45; \frac{B}{T} = 3,07$ и значения T			При $l = 0,54; \frac{B}{T} = 5,32$ и значения T		
	0,3	0,5	0,9	0,0	0,5	0,9
$\frac{L}{B}$	8,36	6,75	10,08	8,72	8,86	10,37
$\frac{B}{L}$	12,9	12,8	12,3	12,8	12,2	11,9
τ_0	10,3	10,7	10,6	10,5	10,4	10,3

Проверочный расчет, сделанный в табл. 41, приводит к выводу, что все рассматриваемые комбинации элементов корабля удовлетворяют установленному условию $\tau_0 > 10$ сек.

Ниже приведен другой способ решения рассматриваемой задачи, отличающийся большей трудоемкостью, но позволяющий представить результаты в более наглядной форме. Он основан на расчетных формулах, полученных на основании устойчивости путем водотонности граничных значений отношения L/B :

$$\frac{h}{B} = \frac{0,70 \cdot \frac{T}{B} \left(2\pi \frac{B}{T} - 1 \right)}{V^{1/2} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{L}{B} \right)^2 \frac{B}{T} \right]^{1/2}} \cdot \frac{1}{V_{\max}} \quad (209)$$

$$\frac{h}{B} = 0,308 \frac{B}{V^2} = 0,308 \frac{V^{1/2}}{V^2} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{L}{B} \right)^2 \frac{B}{T} \right]^{1/2} \quad (210)$$

Зависимости (209) и (210), аналогично зависимостям (206) и (208), связывают относительную гидродинамическую систему с предельным углом крена на циркуляции и минимальным периодом свободных поперечных колебаний. Они могут быть получены на основании путем замены l и B их значениями и зависимостями от $L, L/B$ и L/T .

На основе формул (206) и (210) получим следующие для модификации уравнения устойчивости:

$$\tau_0 \left(\frac{B}{T} \right)^{1/2} = 0,70 \frac{2\pi \frac{B}{T} - 1}{V^{1/2} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{L}{B} \right)^2 \frac{B}{T} \right]^{1/2}} \cdot \frac{1}{V_{\max}} - \tau_0 + \xi \frac{B}{T} \quad (211)$$

$$\tau_0 \left(\frac{B}{T} \right)^{1/2} = \frac{0,308}{V^2} \frac{V^{1/2}}{V^2} \left(\frac{L}{B} \right)^{1/2} \left(\frac{B}{T} \right)^{1/2} - \tau_0 + \xi \frac{B}{T} \quad (212)$$

Уравнение (211) позволяет определить минимальное, а уравнение (212) — максимальные значения отношения B/T в функции L и L/B .

Для рассматриваемого выше примера эти уравнения переписываются так:

$$\tau_0 \left(\frac{B}{T} \right)^{1/2} = \frac{2,03}{\left[\frac{1}{2} \left(\frac{L}{B} \right)^2 \frac{B}{T} \right]^{1/2}} - \tau_0 + 1,26; \quad (213)$$

$$\tau_0 \left(\frac{B}{T} \right)^{1/2} = 0,092 \frac{1}{L^2} \left(\frac{B}{L} \right)^{1/2} \left(\frac{B}{T} \right)^{1/2} - \tau_0 + 1,26. \quad (214)$$

Для упрощения анализа целесообразно рассматривать отношения B/T в формулах (213) и (214) не как постоянные, а как заданные величины, однако необходимо предварительно установить возможные пределы их изменения.

Результаты подсчетов сведены в график, приведенный на рис. 56, на котором нанесены сплошными линиями расчетные (по углу крена на циркуляции) и пунктиром — максимальные (по перекоду свободных поперечных площадей) значения отношения B/T в функции коэффициента общей плотности. По оси абсцисс для каждого значения отношения L/B отложена соответствующая величина коэффициента λ . Штриховкой выделены области возможных значений отношения B/T . Эти выражаются следующими выражениями:

$\frac{L}{B}$	$\lambda = 0,48$	$\lambda = 0,50$	$\lambda = 0,52$	$\lambda = 0,54$
9,0	3,10—3,11	3,18—3,19	3,26—3,28	3,35—3,36
10,0	3,08—3,11	3,16—3,17	3,25—3,26	3,32—3,36
11,0	3,07—3,08	3,13—3,16	3,21—3,24	3,29—3,34
В среднем	3,08—3,10	3,15—3,17	3,23—3,25	3,32—3,35



Рис. 56. Значения отношения B/T в функции λ и L/B , удовлетворяющие требованиям, ограничивающим крен на циркуляции и перекоды свободных поперечных площадей судна.

$$\frac{\Delta \lambda}{B} = \frac{\lambda_0}{L} \left(1 - \frac{\lambda_0}{T} \right) \left(\frac{d}{T} + \frac{1}{2} \lambda_0 \frac{1 - \frac{\lambda_0}{T}}{x - \frac{T}{L}} \right) \frac{T}{B} - \frac{1}{12} \frac{\lambda_0}{L} \frac{B}{T}. \quad (215)$$

где λ_0 — коэффициент плотности погруженной площади модель-скаута

выше двойного днища;

d — возмущение грузовой палубы над центром тяжести возмущенного отсека;

L — длина затопленного отсека.

Подставив в формулу (215)

$$L = \sqrt[3]{V} = \sqrt[3]{\left[\frac{1}{\lambda} \left(\frac{L}{B} \right)^2 \frac{B}{T} \right]^{1/2}}$$

и заданные численные значения остаточной относительной метацентрической высоты λ . После этого нетрудно определить искомую относительную метацентрическую высоту судна в рассматриваемом состоянии

$$\frac{b}{B} = \frac{\lambda \delta}{B} + \epsilon,$$

а, подставляя найденные значения b/B в уравнение остойчивости, определяем соответствующее им значение отношения B/T .

Полным схематическим примером, являющимся

$$V = 5220 \text{ м}^3; \quad \alpha = 0,01 \text{ м};$$

$$\frac{H}{T} = 1,52; \quad \lambda_0 = 1,0;$$

$$\gamma = 0,62; \quad \frac{\Delta \lambda}{T} = 0,16;$$

$$\lambda = 0,545; \quad L_0 = 16,0 \text{ м},$$

$$\epsilon = 0,72$$

тогда

$$\frac{\lambda}{T} = \frac{1}{2} \left(\frac{T - \lambda_0}{T} \right) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\lambda_0}{T} \right) = 0,42.$$

Уравнение остойчивости после подстановки в него численных значений величин, которые рассматриваются как постоянные, принимает следующий вид:

$$\frac{0,0767}{\lambda} + \gamma \frac{\Delta \lambda}{T} - 0,01 \frac{B}{T} + \left[\gamma - 0,38 - \frac{0,234}{\lambda \left(0,714 - \frac{0,922}{\lambda} \right)} \right] = 0.$$

Решая это уравнение для нескольких значений λ и L , найдем следующие значения B/T (см. также рис. 57):

λ	$\lambda = 0,54$	$\lambda = 0,56$	$\lambda = 0,58$
5,0	2,35	2,37	2,42
6,0	2,29	2,35	2,41
7,0	2,27	2,30	2,40

§ 9. СПОСОБ ПОСТОЯННЫХ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРЕНИЙ

Как отмечалось в § 4, если при определении элементов проектируемого судна методом вариаций его грузоподъемность оговаривается лишь приблизительно, целесообразно разбить сопоставляемые варианты на группы, в пределах которых принимается

$$L; B; T = \text{const};$$

$$\lambda = \lambda_1; \lambda_2; \lambda_3; \dots$$



Рис. 57. Значения отношения B/T в функции λ и L , удовлетворяющие требованиям, регламентирующим аварийную остойчивость судна.

Остановимся подробнее на этом способе решения задачи, названном для краткости способом постоянных главных размеров. Примем также

$$N = \text{const.}$$

В этом случае для определения функциональных зависимостей

$$P; c_{\text{вк}}; \frac{P_2}{P}; Q; q; k; \dots = f(B)$$

можно воспользоваться схемой, приведенной в табл. 42. При этом можно либо изменить высоту надводного борта так, чтобы удельная вместимость судна оставалась во всех случаях одинаковой, либо принимать $N = \text{const.}$

Таблица 42

Расчетная схема способа постоянных главных размеров

Показатели судна и веса	$z = z_0$	$z = z_0$	$z = z_0$	$z = z_0$
$rLBV = \text{const}$				
D				
$v_{\text{вк}}$ (из отдельной таблицы)				
P_1				
P_2				
$\frac{P_2}{P}$				
$P = \frac{P}{D} = z$				
$v_{\text{вк}} = \frac{r}{v_{\text{вк}}}$				
$v_{\text{тр}} = \frac{z P v_{\text{вк}}}{P}$				
$v_{\text{св}} = \text{const}$				
$c = v_{\text{вк}} + v_{\text{тр}} + v_{\text{св}}$				
$A = \frac{r}{c}$				
$Q = P a$				
$\frac{P_{\text{вк}}}{P}$				
K (из отдельной таблицы)				
S (из отдельной таблицы)				
$A = \frac{K}{Q}$				
$q = \frac{S}{Q}$				

Если задача решается при $\mu = \text{const}$, то в первом приближении также целесообразно принять $N = \text{const}$. После этого, воспользовавшись уравнением зависимости, можно определить необходимое приращение высоты борта и соответствующее приращение веса стада. С достаточной точностью можно принять, что для сопоставляемых вариантов судна $\Delta P_{\text{вк}} = \pm \Delta P_{\text{св}}$.

Совместное рассмотрение вариантов судов, имеющих одинаковую длину, ширину и осадку $\left(\frac{L}{B} = \frac{B}{T} = \text{const}\right)$, позволяет упростить расчеты и значительно повысить их точность. Действительно (см. § 4), поскольку отдельные варианты мало отличаются друг от друга по водозащитности корпуса, притом исключительно за счет веса стада и корпуса, можно считать, что их стоимость также приблизительно одинакова. Полнота, вызванная принятым допущением, в известной мере компенсируется упрощением технологии постройки судна по мере увеличения коэффициента общей полноты, вследствие удлинения цилиндрической части и увеличения полноты оконечностей.

Таким образом, при сопоставлении вариантов, отнесенных к одной группе, отпадают затруднения, вызванные большими погрешностями расчетов отпускной стоимости судна.

Поскольку $K \approx \text{const}$, минимум удельных капитальных затрат $A = \frac{K}{Q}$ наступает приблизительно при тех же значениях коэффициента общей полноты, что и максимум провозной способности. Кроме того, минимальное отношение $\frac{P_{\text{вк}}}{P}$ и себестоимости перевозки груза также соответствуют приблизительно одинаковым значениям этого коэффициента, так как эксплуатационные расходы зависят от варианта в основном за счет стоимости сжигаемого топлива и масла.

Вследствие малости, для определения оптимальных сочетаний эксплуатационной скорости хода и коэффициента общей полноты можно ограничиться при принятой постановке задачи расчетами провозной способности и относительного запаса топлива. Если при этом для рассматриваемых условий эксплуатации судна продолжительность стоянок на грузовых операциях относительно мала по сравнению с ходовым временем, к чему следует стремиться, то, как доказано ниже (см. § 1 главы десятой), одинаковые значения коэффициента общей полноты соответствуют экстремальным точкам всех рассматриваемых показателей. Таким образом, в данном случае результаты, к которым приводит метод вариаций, перестают зависеть от критерия, выбранного для оценки экономичности судна.

Отмеченные преимущества способа постоянных главных размеров отпадают, когда сравниваются варианты судна, принадлежащие к разным группам. С другой стороны, как показывают численные расчеты, изменение соотношений главных размеров не

приводит к существенному изменению экономических показателей судна. Это позволяет во многих случаях ограничиться рассмотрением лишь одного сочетания главных размеров, соответствующего основному варианту судна. Однако после определения коэффициента общей полноты может возникнуть необходимость изменения принятых первоначально размеров судна для улучшения его технических показателей.

В тех случаях, когда способ постоянных главных размеров применяется при

$$v_{\text{пр}} = \text{const},$$

расчетная схема для определения функциональных зависимостей

$$P; N; \frac{P}{N}; Q; q; k; \dots = f(\delta)$$

также может быть принята по табл. 42, если в последней вместо $v_{\text{пр}}$ ввести N . В этом случае в пределах одной группы стоимости вариантов судна тоже может быть определена более точно, чем при $P = \text{const}$, так как изменяется в основном лишь стоимость механизмов. Поэтому и другие экономические показатели судна могут быть определены сравнительно точно.

§ 16. ПРАКТИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ О ПРИМЕНЕНИИ МЕТОДА ВАРИАЦИЙ

Для получения показательных результатов с помощью метода вариаций нужно придерживаться следующих правил.

До исследования значения рассматриваемых методом элементы основного варианта судна должны быть определены с достаточной степенью точности способом последовательных приближений или путем более или менее детальных расчетов по прототипу.

Следует иметь в виду, что варианты кривых, которыми выражаются зависимости, исследуемые методом вариаций, могут значительно изменяться в материале, имеющем практическое значение. Чтобы получить возможность узнать характер подобных кривых, необходимо варьировать соотношения элементов судна в широких пределах. При этом не следует считаться с тем, что кривые кривые могут значительно отличаться от общепринятых.

Принимая результаты могут быть получены, если предельные одноименные соотношения отличаются друг от друга не менее, чем на 15% (например, $\delta = 0,65 - 0,75$; $\frac{1}{\delta} = 7,0 - 8,0$), однако лучше изменять соотношения элементов судна в несколько более широких пределах.

Количество вариаций по каждому рассматриваемому соотношению должно выбираться так, чтобы кривые, изображающие результаты исследования, могли быть проведены по достаточному

числу точек. В качестве минимальных цифр можно назвать четыре точки для кривых, имеющих экстремальные значения, и три точки — для кривых, изменяющихся монотонно. Желательно увеличивать число используемых точек соответственно до четырех и пяти.

При оценке результатов, полученных методом вариаций, следует учесть, что предварительные расчеты элементов судна не отличаются большой точностью. Однако в настоящем случае необходимо получить лишь данные, позволяющие сопоставить отдельные варианты судна. Естественно определять их, применяя одинаковые предположения о качестве стали, соотношениях между теоретическим и практическим весом котлов, удельном весе леса в деревянных конструкциях, гидрометорологических условиях плавания, конструктивных шероховатостях наружной обшивки, обшивки корпуса и т. п. Поэтому общий характер исследуемых зависимостей может быть установлен значительно более точно, чем в тех случаях, когда требуется определить гарантийные показатели спроектированного судна.

В связи с затронутым вопросом отметим, что вид кривых, выражающих показатели судна, в значительной степени зависит от способа, принятого для определения сопротивления воды движению судна. Поэтому расчеты лодкости должны выполняться наиболее точными из возможных в каждом частном случае способов. Если есть подходящие данные о серийных испытаниях моделей, эти материалы необходимо положить в основу расчетов сопротивления воды. Большое значение следует уделять вопросу о влиянии гидрометорологических условий и обшивки корпуса на лодкость судна в характерных для него условиях.

С максимально достижимой точностью должны быть выполнены также расчеты нагрузки. Если нагрузка определяется путем подробных расчетов, она может быть вынесена в отдельную таблицу. Такие расчеты выполняются в следующей последовательности (см. табл. 43). Сначала для судна-прототипа определяются численные значения модулей, а затем (путем деления весов на модули) — соответствующие им измерители. После этого для каждого сопоставляемого варианта судна определяются одноименные модули и соответствующие им веса путем умножения найденных ранее измерителей на численные значения модулей. Сгруппированные по разделам веса вносятся в табл. 35 или 42.

Расчеты провальной способности, относительного запаса тоннажа, а при $L; B; T; N = \text{const}$ также прочих экономических показателей судна могут быть выполнены с той же точностью, что и расчеты технических показателей. В общем же случае погрешности расчетов удельных капитальных затрат и себестоимости перевозок груза выражаются более высокими цифрами.

Вследствие отмеченных обстоятельств выводы, к которым приводит метод вариаций, не отличаются большой строгостью. Поэтому нельзя считать, что уже в настоящее время этот метод может

Формула расчета	Прототип			Вариант I		Вариант II	
	вес	модуль	энергетика	модуль	вес	модуль	вес
L_{BH}							
$L(B+N)$							
L_B							
.....							
.....							
Итого	Σ_0	—	—	—	Σ_1	—	Σ_2

во всех случаях полностью заменить эмпирические зависимости, которыми пользуются при выборе соотношений элементов и коэффициентов теоретического чертежа.

В заключение отметим, что при определении элементов проектируемого судна методом вариаций не следует пользоваться дифференциальными уравнениями. Действительно, дифференцирование уравнений приводит к искажению исследуемых зависимостей, поскольку, независимо от реальных закономерностей, рассматриваемые показатели судна становятся линейными функциями от праращения его элементов. Комбинируя такие линейные функции, нельзя получить правильного представления об оптимальных соотношениях.

§ 11. ЭКОНОМИЧЕСКИ ВЫГОДНАЯ ДЛИНА ГРУЗОВОГО СУДНА ПО ШЕКЛУТУ

В работе Шеклута [65] приведены результаты исследований наиболее выгодной длины грузовых судов. Основная эмпирическая формула, полученная автором путем систематических расчетов, выполненных при различных исходных предположениях, относится к стандартным грузовым судам со следующими особенностями. Тип судов — теплоходы с избыточным надводным бортом (закрытый шельтердек). Объем корпуса превосходит на 66% объемное водозаполнение ($W_2 = 1,66V$). Отношение $\frac{B}{T} = 2,35$.

В расчетах Шеклута сопротивление воды движению судна определялось по графикам Эйра в предположении, что коэффициент обшей полноты корпуса равен

$$\zeta = 1,08 - 1,68Fr.$$

Вес стали определялся по Рестеру.

При принятых допущениях оказалось возможным выразить оптимальную длину судна формулой

$$\frac{L}{100} = 0,975 \left(\frac{D}{3000} \right)^{0,25} \left(\frac{v}{10} \right)^{0,5} (1 + 0,079 \sqrt{1 - 0,4}),$$

где $\varepsilon = \frac{S_N}{S_{cr}}$ — отношение относительных затрат, зависящих от мощности механизмов, к относительным затратам, зависящим от веса стали в составе корпуса. Последние показатели определяются исходя из абсолютных годовых затрат по формулам

$$S_N = \frac{S_N}{N}; \quad S_{cr} = \frac{S_{cr}}{P_{cr}}.$$

Отступления от стандартных условий учитываются следующими поправками:

$$\text{При } \Delta \left(\frac{B}{T} \right) = \pm 0,01 \text{ поправка } \Delta L = \pm 0,46\%$$

$$\Delta \left(\frac{W_2}{V} \right) = \pm 0,10 \quad \Delta L = \pm 0,75\%$$

Поправка для полнотных судов

$$\Delta L = -1,2\%.$$

Поправки для судов открытого шельтердека типа, зависящие от затрат, связанных с размером регистрационного тоннажа, даются в отдельной таблице. Большей частью эти поправки лежат в пределах от $\Delta L = -1$ м до $\Delta L = -2$ м.

По словам Шеклута, отношение ε редко выходит из пределов $\varepsilon = 0,8 - 1,6$. В соответствии с этим можно представить формулу Шеклута в виде

$$\frac{L}{100} = a \left(\frac{D}{1000} \right)^{0,25} \left(\frac{v}{10} \right)^{0,5},$$

где a — численный коэффициент, принимающий следующие значения:

ε	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
a	1,025	1,035	1,045	1,052	1,055

Таким образом, $a = 1,04 \pm 1,5\%$ и, следовательно, отношение ε не оказывает большого влияния на оптимальную длину судна. Приняв $\varepsilon = 1,04$, $D = 10\,000$ м, найдем по последней формуле:

$$L = 123 \text{ м при } v = 14 \text{ узл.}$$

$$L = 131 \text{ м при } v = 16 \text{ узл.}$$

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОЕКТИРУЕМОГО СУДА. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА ВАРИАЦИЙ

§ 4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ МЕТОДА ПОСТОЯННЫХ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРЕНИЙ СУДА

В предыдущей главе был развит численный способ определения оптимальных сочетаний элементов и скорости судна, названный способом постоянных главных размерений. Ниже [32] дается математическое решение этой задачи применительно к вариантам судна, отличающимся коэффициентом общей полноты, в предположении, что

$$N; L; B; T = \text{const},$$

и следовательно, как было отмечено ранее,

$$D_{\text{свс}} = P_s + P_m \approx \text{const}.$$

Найдем вычлеле соотношения, при которых относительный расход топлива становится наименьшим. Задача сводится к определению минимума отношения

$$\pi = \frac{P_T}{P}, \quad (216)$$

в котором

$$\left. \begin{aligned} P_T &= P_T' + P_T'' + P_T''' = P_T' \frac{r}{v_{\text{св}}} + P_T'' \frac{P}{A} + P_T'''; \\ P &= D - P_T' \frac{r}{v_{\text{св}}} - P_T'' \frac{P}{A} - P_T''' - D_{\text{свс}} - P_C'; \end{aligned} \right\} \quad (217)$$

В формулах (217) приняты следующие обозначения: P_T' , P_T'' , P_T''' — веса топлива, израсходованного на протяжении переходов, во время стоянок под грузовыми операциями и во время стоянок вне грузовых операций; $A = \frac{P}{210 v_{\text{св}}}$ — приведенная норма грузовых работ в тоннах, устанавливаемая в зависимости от числа погрузок

При тех же эксплуатационных скоростях [30] статистическая формула $L = 2,35 D^{\frac{1}{3}} v^{\frac{1}{3}}$ дает соответственно $L = 122$ м и $L = 128$ м. Эти цифры сравнительно мало отличаются от цифр, полученных из формулы Шеклута.

Более существенная разница получается для судов с большим водоизмещением. Так, при $D = 20\,000$ м получим

$$L = 148 \text{ м при } v = 14 \text{ уз.},$$

$$L = 158 \text{ м при } v = 16 \text{ уз.}$$

По статистической же формуле $L = 153$ м и $L = 160$ м соответственно.

Попытка Шеклута учесть влияние типа судна и отношения ширины к осадке на его оптимальную длину представляет несомненный интерес. Точность же формулы Шеклута вызывает сомнение (см. § 4 к 9).

и выгрузок в рейсе, равном $2a_0$, и коэффициента загрузки судна γ_0 ; μ — действительная норма грузových работ; P'_c — вес команды с багажом. Предполагается (см. стр. 265), что $\beta_1 = 1$.

Зависимость

$$v_{\text{ак}} = f(\beta)$$

считается известной.

Формулы (217) могут быть представлены в виде

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{A}{A + P'_c} \left(D - P'_c \frac{r}{v_{\text{ак}}} \right) + \text{const}; \\ P_r &= \frac{P'_r}{A + P'_c} D + \frac{A P'_r}{A + P'_c} \frac{r}{v_{\text{ак}}} + \text{const}_r \end{aligned} \right\} \quad (218)$$

где под const понимается сумма всех постоянных величин.

Найдем минимум отношения

$$\pi = f(\beta, v_{\text{ак}}),$$

считая, что β — независимая переменная, а $v_{\text{ак}}$ — функция от β . Тогда, дифференцируя π как сложную функцию, получим (учитывая, что с увеличением коэффициента общей полноты скорость падает):

$$d\pi = \left(\frac{\partial \pi}{\partial \beta} - \frac{\partial \pi}{\partial v_{\text{ак}}} \frac{\partial v_{\text{ак}}}{\partial \beta} \right) d\beta$$

и, следовательно,

$$\left(\frac{\partial \pi}{\partial \beta} \right)_{\text{ост}} = \frac{\partial \pi}{\partial \beta} : \frac{\partial \pi}{\partial v_{\text{ак}}} \quad (219)$$

Равенство (219) позволяет определять оптимальное значение коэффициента общей полноты как координату точки пересечения кривых $\frac{\partial \pi}{\partial \beta} = f_1(\beta)$ и $\frac{\partial \pi}{\partial v_{\text{ак}}} = f_2(\beta)$. Первая из них получается дифференцированием кривой $v_{\text{ак}} = f(\beta)$, а вторая может быть получена расчетом, исходя из следующих соотношений, вытекающих из формулы (216):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \pi}{\partial \beta} &= \frac{1}{P_c} \left(P \frac{\partial P_r}{\partial \beta} - P_r \frac{\partial P}{\partial \beta} \right); \\ \frac{\partial \pi}{\partial v_{\text{ак}}} &= \frac{1}{P_c} \left(P \frac{\partial P_r}{\partial v_{\text{ак}}} - P_r \frac{\partial P}{\partial v_{\text{ак}}} \right). \end{aligned}$$

Таким образом,

$$\left(\frac{\partial \pi}{\partial \beta} \right)_{\text{ост}} = \frac{P \frac{\partial P_r}{\partial \beta} - P_r \frac{\partial P}{\partial \beta}}{P \frac{\partial P_r}{\partial v_{\text{ак}}} - P_r \frac{\partial P}{\partial v_{\text{ак}}}} \quad (220)$$

Дифференцируя формулы (218) по β и $v_{\text{ак}}$, найдем частные производные:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial \beta} &= \frac{P'_r}{A + P'_c} \frac{D}{v_{\text{ак}}} ; \quad \frac{\partial P}{\partial v_{\text{ак}}} = \frac{A}{A + P'_c} \frac{D}{v_{\text{ак}}^2} ; \\ \frac{\partial P_r}{\partial v_{\text{ак}}} &= - \frac{A P'_r}{A + P'_c} \frac{r}{v_{\text{ак}}^3} = - \frac{\partial P}{\partial v_{\text{ак}}} \end{aligned}$$

После их подстановки в формулу (220) последняя представится в виде

$$\left(\frac{\partial \pi}{\partial \beta} \right)_{\text{ост}} = \frac{(P_r - P'_r) \frac{D}{v_{\text{ак}}}}{(P + P_r) \frac{r}{v_{\text{ак}}}} \quad (221)$$

В формуле (221)

$$\left. \begin{aligned} P_r - P'_r &= P'_r + P'_r \approx P'_r; \\ P + P_r &= P_{\text{ак}} - P'_c \approx P_{\text{ак}} \end{aligned} \right\} \quad (222)$$

так как P'_c мало по сравнению с P'_r , а P'_c мало по сравнению с $P_{\text{ак}}$. Воспользовавшись формулами (222), можно получить из (221)

$$\left(\frac{\partial \pi}{\partial \beta} \right)_{\text{ост}} = (v_{\text{ак}})'_{\text{ост}} = \frac{D v_{\text{ак}}}{\partial P_{\text{ак}}}$$

или в другом виде

$$\left(\frac{v_{\text{ак}}'_{\text{ост}}}{v_{\text{ак}}} \right)_{\text{ост}} = 1. \quad (223)$$

Остановимся теперь на вопросе о соотношениях, при которых провозная способность

$$Q = \frac{P t}{\tau} = \frac{P t}{v_{\text{ак}} + v_{\text{пр}} + v_{\text{тк}}}$$

достигает максимума. При этом, как и ранее, будем считать, что v зависит от β .

$$P; \tau; Q = f(\beta, v_{\text{ак}})$$

коэффициент β представляет собой независимую переменную, а $v_{\text{ак}}$ — функцию от β . Тогда

$$\begin{aligned} dQ &= \left(\frac{\partial Q}{\partial \beta} - \frac{\partial Q}{\partial v_{\text{ак}}} \frac{\partial v_{\text{ак}}}{\partial \beta} \right) d\beta; \\ \left(\frac{\partial Q}{\partial \beta} \right)_{\text{ост}} &= \frac{\partial Q}{\partial \beta} : \frac{\partial Q}{\partial v_{\text{ак}}} \end{aligned} \quad (224)$$

Частные производные в правой части равенства (224) выражаются формулами

$$\frac{\partial Q}{\partial \tau} = \frac{1}{v^2} \left(\tau \frac{\partial P}{\partial \tau} - P \tau \frac{\partial v}{\partial \tau} \right);$$

$$\frac{\partial Q}{\partial v_{\text{ск}}} = \frac{1}{v^2} \left(\tau \frac{\partial P}{\partial v_{\text{ск}}} - P \tau \frac{\partial v}{\partial v_{\text{ск}}} \right).$$

В соответствии с чем

$$\left(\frac{\partial v_{\text{ск}}}{\partial \tau} \right)_{\text{опт}} = \frac{\tau \frac{\partial P}{\partial \tau} - P \tau \frac{\partial v}{\partial \tau}}{\tau \frac{\partial P}{\partial v_{\text{ск}}} - P \tau \frac{\partial v}{\partial v_{\text{ск}}}}. \quad (225)$$

Заменяя в равенстве

$$\tau = \frac{r}{v_{\text{ск}}} + \frac{P}{A} + \tau_{\text{ст}}$$

вес коммерческого груза P его значением по первой из формул (218), несложно получить

$$\tau = \left(1 - \frac{P_{\tau}}{A + P_{\tau}} \right) \frac{r}{v_{\text{ск}}} + \frac{D}{A + P_{\tau}} + \text{const.}$$

Дифференцируя τ , найдем

$$\frac{\partial \tau}{\partial v_{\text{ск}}} = \frac{1}{A + P_{\tau}} \frac{D}{v_{\text{ск}}};$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial v_{\text{ск}}} = - \left(1 - \frac{P_{\tau}}{A + P_{\tau}} \right) \frac{v_{\text{ск}}}{v_{\text{ск}}}.$$

После подстановки значений частных производных от τ и P по $\dot{v}_{\text{ск}}$ и соответствующих преобразований формула (225) может быть представлена в виде

$$v'_{\text{ск}} = \frac{\partial v_{\text{ск}}}{\partial \tau} = \left(1 + \frac{\tau_{\text{ст}}}{v_{\text{ск}}} \right) \frac{D_{\text{ск}}}{v_{\text{ск}}} \frac{1}{P + P'_{\tau} + P'_{\tau} + P'_{\tau} \tau_{\text{ст}}}$$

и, следовательно,

$$\left(\frac{\partial v_{\text{ск}}}{\partial \tau} \right)_{\text{опт}} = \frac{1 + \frac{\tau_{\text{ст}}}{v_{\text{ск}}}}{1 + \frac{P_{\tau}}{P_{\text{ск}}} \frac{\tau_{\text{ст}}}{v_{\text{ск}}} - P'_{\tau}}.$$

Знаменатель дроби в правой части последнего равенства мало отличается от единицы. Поэтому можно пренебречь

$$\left(\frac{\partial v_{\text{ск}}}{\partial \tau} \right)_{\text{опт}} \approx 1 + \frac{\tau_{\text{ст}}}{v_{\text{ск}}}. \quad (226)$$

При $\tau_{\text{ст}} = 0$ формулы (223) и (226) становятся идентичными. В общем же случае формула (226) приводит к более высоким значениям $\dot{v}_{\text{ск}}$, чем формула (223), однако, как показывают численные расчеты, разница между ними оказывается незначительной. В дальнейшем мы остановимся подробнее лишь на определении оптимального коэффициента общей полноты, соответствующего минимуму относительного расхода топлива, а следовательно — минимуму себестоимости перевозки груза.

Исключая из формулы (223) коэффициент утилизации водозаимания, можно представить ее в более удобном для расчетов виде

$$\left(\frac{v_{\text{ск}}}{v_{\text{ск}}} \right)_{\text{опт}} = \frac{1}{1 - x}, \quad (227)$$

где

$$x = \frac{D_{\text{ск}}}{v_{\text{ск}} \tau_{\text{ст}}}.$$

Формула (227) позволяет найти оптимальное значение коэффициента общей полноты как координату точки пересечения кривых:

$$M_1 = \frac{v_{\text{ск}}}{v_{\text{ск}}} = f_1(\dot{v}_{\text{ск}});$$

$$M_2 = \frac{1}{1 - x} = f_2(\dot{v}_{\text{ск}}).$$

Ниже излагается способ решения рассмотренной задачи, не требующий дифференцирования функции $v_{\text{ск}} = f(\dot{v}_{\text{ск}})$.

Пусть (рис. 58) точка A , принадлежащая кривой $v_{\text{ск}} = f(\dot{v}_{\text{ск}})$, соответствует оптимальному значению коэффициента $\dot{v}_{\text{ск}} = \dot{v}_{\text{ск}}^{\text{опт}}$. Тогда на формулы

$$\left(v'_{\text{ск}} \right)_{\text{опт}} = \frac{v_{\text{ск}}}{1 - x}$$

следует, что угол $AC'C$ равен углу $AC'C'$ (так как тангенсы этих углов равны соответственно $v'_{\text{ск}}$ и $\frac{v_{\text{ск}}}{1 - x}$). При этом точка C' лежит на расстоянии $2\dot{v}_{\text{ск}} - x$ от начала координат.

Допустим, что на кривую $v_{\text{ск}}$ нанесены точки, соответствующие определенным значениям $\dot{v}_{\text{ск}} = \dot{v}_{\text{ск}}$. Соединим их прямыми с точками C' на оси абсцисс, расположенными на расстояниях $2\dot{v}_{\text{ск}} - x$ от начала координат. Если одна из прямых окажется касательной к кривой, то точка касания будет соответствовать оптимальным значениям коэффициента $\dot{v}_{\text{ск}}$ и скорости $v_{\text{ск}}$.

Следует отметить, что известные прямые графического и численного дифференцирования кривых не отличаются большой точностью. То же можно сказать и об изложенном приеме решения задачи.

Достоинством последнего является простота и наглядность, что дает основание пользоваться им в практических расчетах.

Приведенные данные показывают, что оптимальные сочетания коэффициента δ и скорости $v_{\text{ок}}$ определяются в основном характером кривой $v_{\text{ок}} = f(\delta)$. Меньшее влияние оказывает отношение $\kappa = (1 - \gamma_{\text{ок}}) \delta$. Коэффициенты

$$M'_0 = \frac{v'_{\text{ок}} \gamma_{\text{ок}}}{v_{\text{ок}}};$$

$$M'_0 = \frac{v'_{\text{ок}} \gamma_{\text{ок}}}{v_{\text{ок}}} - \frac{\gamma_{\text{ок}}}{\kappa}$$

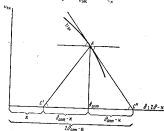


Рис. 68. Графический способ определения оптимальных значений коэффициента обвалки и эксплуатационной скорости хода.

могут рассматриваться как критерии экономичности судна (первый — исходя из минимума относительного расхода топлива и стоимости перевозки груза, а второй — исходя из максимума провозной способности и минимума удельных капитальных затрат). Теоретически оптимальным сочетаниям коэффициента δ и скорости $v_{\text{ок}}$ соответствуют $M'_0 = 1$ и $M'_0 = 1$. Практически же можно изменять эти коэффициенты в некоторых пределах (по-видимому, на 20—30%) без существенного ухудшения экономических показателей судна¹.

¹ При увеличении коэффициента δ одновременно увеличивается провозная $v_{\text{ок}}$ и коэффициент $\gamma_{\text{ок}}$, а скорость $v_{\text{ок}}$ — уменьшается. Поэтому показатели M'_0 и M'_0 возрастут или уменьшатся значительно быстрее коэффициента δ .

§ 2. ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕСОВОЗОВ

Вопросы проектирования лесовозов освещены в работах [1], [14], [18], [24], [55], [56].

В отечественной практике лесовозы используются для перевозки леса, зерна, угля, генеральных грузов, машинного оборудования и т. п. В дальнейшем основным характерным случаем использования судна считается перевозка леса и зерна.

Регламентированный надводный борт лесовозов с грузом леса меньше надводного борта, соответствующего обычной грузовой мере. В первом приближении можно исходить из следующих цифр, дающих представление об изменении осадки и водоизмещения лесовозов в рейсах с лесом и зерном:

$$\frac{T_2}{T_1} = 1,04 - 1,07; \quad \frac{D_2}{D_1} = 1,05 - 1,08.$$

Две грузоподъемности судна P_0 и P_2 , где

$$P_2 = P_0 + P_6$$

суммарный вес леса и балласта, соответствуют для коэффициента утилизации водоизмещения

$$\gamma_0 = \frac{P_0}{D_0}; \quad \gamma_2 = \frac{P_2}{D_2}.$$

При выборе значения начальной метacentрической высоты лесовоза с грузом зерна и полным запасом приходится считаться с тем, что чрезмерная начальная остойчивость судна неблагоприятно сказывается на его мореходности. Ограничивая же остойчивость лесовоза в этих условиях нагрузкой, мы приходим к необходимости прибегать к его балластировке для сохранения минимальной необходимой метacentрической высоты в тех случаях, когда судно перевозит лесной груз.

Пусть h' и h'' — метacentрическая высота судна соответственно при перевозке зерна и леса без учета влияния жидких грузов. Изменение начальной метacentрической высоты $\Delta h = h' - h''$ определяется зависимостью

$$\Delta h = \Delta m - \Delta Z_g,$$

где Δm — положительное или отрицательное приращение возмущенной метacentры, связанное с изменением осадки и зависящее от формы судна;

ΔZ_g — положительное приращение ординаты центра тяжести судна.

Приращение Δh рассматривается в дальнейшем как заданная величина. Изменение же возмущенной метacentры Δm может быть подсчитано с помощью приближенных формул для определения элементов плавучести и остойчивости.

Вес балласта, предусматриваемого для рейсов с лесным грузом, должен обеспечить выполнение условия

$$\Delta Z_d = \Delta m - \Delta b, \quad (228)$$

Это равенство является исходным при проектировании лесовозов.

В качестве проектных коэффициентов, более или менее характерных для отечественной практики, можно назвать

$$\frac{b'}{b} = 0,065 - 0,070;$$

$$\frac{h'}{h} = 0,015 - 0,020,$$

однако следует отметить [55], что расчетная метасецентрическая высота лесовоза с палубным грузом определяется в проектах при условии допущения о расположении леса в трюмах. Поэтому она отличается от реальной метасецентрической высоты в действительных условиях эксплуатации.

Зависимости, определяющие вес и осьмцу укладки палубного груза. Введем обозначения:

$P_{тр}$, P_d — вес леса в трюмах и на палубе;

$\rho_d = \frac{P_d}{V_d}$ — удельная вместимость трюмов по сыпучему грузу;

$\rho'_d = \frac{P_d}{P_{тр}}$ — приведенная удельная вместимость трюмов по лесному грузу;

ρ'_d — удельная погрузочная кубатура палубного леса;

S — площадь, занимаемая лесом на палубе (включая локи);

a , c , f — объем, площадь и высота грузовых локов.

При определении полезной площади S учитываются потери, вызванные установкой ограждения вдоль фальшборта, наличием платформ под лебедками и т. п.

Приведенная удельная вместимость трюмов по лесному грузу связана с удельной вместимостью по сыпучему грузу $\frac{P_{тр}}{P_d}$ зависимостью

$$\rho'_d = \frac{P_{тр}}{P_d} \frac{W_{тр}}{W_d},$$

где $W_{тр}$ — объем грузовых трюмов, исчисленный по сыпучему грузу.

В дальнейшем используются также следующие безразмерные коэффициенты:

$$x' = \frac{P_d}{P_a}; \quad x'' = \frac{W_d}{SH}; \quad x''' = \frac{a}{W_d}.$$

Весы P_a и P_d связаны следующими соотношениями:

$$P_a = P_d - P_{тр} = P_d - \frac{P_d}{\rho_d};$$

$$x' = \frac{P_d}{P_a} = 1 - \frac{P_d}{P_a} \frac{P_d}{P_d - P_d} \quad (229)$$

Последняя формула приводится к виду

$$x' = 1 - \frac{P_d}{P_a} \frac{1}{\frac{P_d}{P_a} - 1} \frac{P_d}{P_d} \frac{D_d}{D_d} \quad (230)$$

Относительный вес балласта в формуле (230) рассматривается как искомая величина. Для судна с данной грузоподъемностью все остальные безразмерные множители представляют собой более или менее стабильные соотношения. В первоначальных расчетах они могут быть определены по прототипу.

В формулах (229) и (230) удельная вместимость трюмов ρ_d представляет собой величину постоянную, так как предполагается, что грузовые трюмы, независимо от их кубатуры, полностью загружены лесом. Поскольку в рассматриваемой задаче $P_d = const$, удельная вместимость трюмов ρ_d представляет собой величину переменную, зависящую от кубатуры трюмов.

Коэффициент x' играет существенную роль как показатель эксплуатационных качеств лесовоза, так как от него зависит высота укладки леса на палубе и положение центра тяжести лесного груза и целого. Приведенные формулы показывают, что этот коэффициент быстро убывает как с увеличением удельной вместимости трюмов по сыпучему грузу, так и по мере увеличения веса балласта.

Высота палубного груза может быть подсчитана по формуле

$$h_d = \frac{\rho'_d P_d}{S} + \frac{a}{S} = \frac{\rho'_d W_d}{S} \frac{P_d}{P_{тр}} + \frac{a f}{S}, \quad (231)$$

где $W_d = \rho'_d P_{тр}$. Учитывая, что

$$\frac{P_d}{P_{тр}} = \frac{P_d}{P_d - P_{тр}} = \frac{x'}{1 - x'},$$

можно представить формулу (231) в виде следующих равенств

$$\frac{h_d}{H} = \frac{\rho'_d W_d}{\rho'_d S H} \frac{x'}{1 - x'} + \frac{a f}{S H}; \quad (232)$$

$$\frac{h_d}{H} = \frac{\rho'_d}{\rho'_d} \frac{x' x''}{1 - x'} + x' x'' \quad (233)$$

Возвышение центра тяжести палубного груза над основной плоскостью выражается в относительных единицах формулой

$$\frac{z_2}{H} = \frac{H_2}{H} + \alpha \frac{h_2}{H}, \quad (234)$$

где H_2 — приведенная высота борта, α — численный коэффициент.

Отношение $\frac{H_2}{H}$ учитывает влияние осадковости и погоды бимсов.

Поскольку палубный лес расположен частично на грузовых люках, коэффициент α несколько больше 0,5.

В предварительных расчетах коэффициент α'' в формуле (233) может быть определен по подложному прототипу. Обычно для судов с вертикальными бортами он лежит в пределах

$$\alpha'' = 0,95 - 1,15.$$

В соответствии с действующими правилами, чтобы получить возможность использовать грузовые люки в качестве палубы при перевозке зерна, необходимо соблюсти условие

$$\alpha'' > 0,02.$$

На современных отечественных лесовозах $\alpha'' = 0,03$. При наименьшей тенденции к увеличению коэффициента раскрытия палуб можно предположить, что в дальнейшем коэффициент α'' несколько возрастет.

В отечественной практике проектирования лесовозов обычно условно принимают

$$z_0' = z_0'' = z_0.$$

Из изложенного следует, что высота палубного груза и возвышение его центра тяжести определяются в основном коэффициентами α' и α'' . Как отмечалось, для уменьшения коэффициента α' можно прибегнуть к увеличению удельной вместимости трюмов ρ_2 . Это может быть осуществлено путем уменьшения коэффициента δ и увеличения габаритных размеров судна. Одновременно, однако, возрастает вес корпуса и стоимость судна. Поэтому рациональные значения удельной вместимости ρ_2 могут быть установлены лишь на основе детальных технических и экономических расчетов.

Существенное влияние на коэффициент α'' оказывает свободная площадь палубы S , используемая для погрузки леса. Она может быть увеличена путем уменьшения длины надстроек, рационального расположения лебедок и пр. В частности, для лучшего использования площади палубы целесообразно ограничиться установкой двух стрел или кранов на каждый грузовой люк, если это допустимо по условиям эксплуатации судна. Грузовые средства, обслуживающие крайние люки, выгодно устанавливать на палубах юта и боба.

Определение элементов лесовоза. При определении элементов лесовоза могут быть использованы различные расчетные схемы.

Проще всего решать подобную задачу исходя из заданной грузоподъемности и выбранного значения метacentрической высоты, соответствующих рейсу с зерном. После этого нетрудно определить вес балласта, обеспечивающего необходимую остойчивость судна и при перевозке лесного груза.

Целесообразно определять вес балласта для ряда вариантов судна, отличающихся коэффициентом общей полноты, соотношениями главных размеров, а следовательно и вместимостью грузовых трюмов. Эта задача может быть решена с помощью формул (230), (233) и (234) и формул, выведенных ниже. В своей совокупности эти безразмерные зависимости дают наглядное представление о влиянии отдельных факторов на вес балласта, привязанного на лесовозах при перевозке палубного груза.

Воспользуемся аксиомой тяжести судна над основной плоскостью при выходе его в рейс с грузом зерна найдем из уравнения моментов

$$D_z Z_g = D_z z_0' + P_z z_{tr}, \quad (235)$$

где $D_z = D_0 - P_0$ — водоизмещение судна без груза и балласта; Z_g и z_0' — ординаты центра тяжести судна при водоизмещении D_z и D_0 ;

z_{tr} — ордината центра тяжести объема грузовых трюмов по сыпучему грузу (предполагается, что трюмы целиком заполнены).

Аналогичное уравнение для судна, перевозящего лесной груз, может быть представлено в виде

$$D_z Z_g = D_z z_0' + P_{tr} z_{tr} + P_g z_g + P_b z_b, \quad (236)$$

где Z_g' — ордината центра тяжести судна при выходе в рейс с лесным грузом;

z_0' — ордината центра тяжести судна при водоизмещении D_0 и измененном распределении топлива;

z_{tr} — ордината центра тяжести леса в трюмах;

z_g — ордината центра тяжести балласта.

Формулы (235) и (236) после подстановки

$$P_0 = P_1 + P_{tr} + P_0$$

позволяют определить выражение

$$\Delta Z_g = - \frac{P_0}{D_0} (z_0' - z_0) + \eta_0 \left(1 - \frac{\eta_0}{\eta_0} \frac{P_2}{\rho_2} \frac{D_2}{D_0} \right) z_0 - \eta_0 \left(z_{tr} - \frac{P_1}{\rho_1} \frac{D_1}{D_0} z_{tr}' \right) - (z_g' - z_0) - (\eta_0 z_0' - \eta_0 z_0), \quad (237)$$

где

$$\Delta Z_g = Z_g' - Z_g.$$

Значения в формуле (237) ординаты z_p произведений $\xi_p H$, в которых ξ_p — коэффициенты, устанавливаемые в первом приближении по протоколу, найдем в безразмерных единицах:

$$\frac{\Delta z_p}{H} = -\frac{P_p}{D} (\xi_p - \xi_0) + \eta_p \left(1 - \frac{\eta_p}{\eta_0} \frac{P_p}{P_n} \frac{D_p}{D_n}\right) \xi_p - \eta_p \left(\xi_p - \frac{P_p}{P_n} \frac{D_p}{D_n} \xi_p\right) - (\xi_p' - \xi_0') - (\eta_p \xi_p' - \eta_0 \xi_0'). \quad (238)$$

В частном случае, когда $\xi_p' = \xi_0' = \xi_p$ и $\xi_0' = \xi_0' = \xi_0$ (судовые запасы в рейсах с лесом и зерном размещаются в одних и тех же отсеках), уравнение (238) упрощается и принимает вид

$$\frac{\Delta z_p}{H} = -\frac{P_p}{D} (\xi_p - \xi_0) + \eta_p \left(1 - \frac{\eta_p}{\eta_0} \frac{P_p}{P_n} \frac{D_p}{D_n}\right) \xi_p - \eta_p \left(1 - \frac{P_p}{P_n} \frac{D_p}{D_n}\right) \xi_p - (\eta_p - \eta_0) \xi_p. \quad (239)$$

Ординаты z_p и ξ_p , фигурирующие в рассматриваемых уравнениях, зависят от высоты палубного груза, которая, в свою очередь, зависит от веса балласта. Поэтому при решении уравнений (238) и (239) целесообразно задаваться несколькими значениями отношения $\frac{P_p}{D_p}$ и определять для каждого из них численные значения коэффициента η' , отношения $\frac{\eta_p}{\eta_0}$ и безразмерной ординаты $\xi_p = -\frac{z_p}{H}$ по формулам (230), (233) и (234). После этого для каждого сочетания $\frac{P_p}{D_p}$ и ξ_p нетрудно определить соответствующие им значения приращений

$$\Delta z_p = \Delta m - \Delta h = f\left(\frac{P_p}{D}\right) \quad (240)$$

и установить графически относительный вес балласта, при котором приращение Δh в формуле (240) становится равным заданному приращению.

Выше отмечалось, что вес балласта сравнительно быстро уменьшается с увеличением отношения $\frac{P_p}{D_p}$, вследствие уменьшения

веса палубного груза и снижения его центра тяжести. Из формулы (239) следует, что для уменьшения веса балласта выгодно увеличивать относительную ординату центра тяжести объема трюма. Это может быть осуществлено за счет увеличения высоты двойного дна. Той же цели можно достигнуть путем применения V-образных шпангоутов и наклонных бортов. Подобные обводы приводят к

к более выгодным соотношениям в полостях метacentра, соответствующих эквивалентным D_p и D_n . Они позволяют также получить более значительный выигрыш в грузоподъемности при переходе от водоизмещения D_p к водоизмещению D_n .

Вместе с тем нужно учитывать, что резко выраженные V-образные шпангоуты и наклонные борта увеличивают сопротивление воды движению судна. Вследствие этого целесообразнее, по-видимому, применять наклонные борта лишь в тех случаях, когда грузовой интервал, как это предлагается в статье [24].

Уравнение (239) показывает также, что вес балласта снижается с увеличением относительной ординаты ξ_p . Увеличению этой ординаты способствуют V-образные шпангоуты и наклонные борта, при которых центр тяжести корпуса перемещается несколько вверх. Ордината ξ_p увеличивается также, если топливо перевозится частично в высоких отсеках. Однако более значительный эффект, как это следует из уравнения (238), можно получить, если в рейсах с палубным грузом топливо размещается в двойном дне, а при перевозке зерна используются частично высокие отсеки.

§ 3. ОСНОВАНИЕ ВЫБОРА КОЭФФИЦИЕНТА ОБЩЕЙ ПОЛНОТЫ НЕФТЕВОЗА ВОДОИЗМЕЩЕНИЕМ 15 000—18 000 т

Рассмотрим вопрос о выборе коэффициента общей полноты нефтевоза с водоизмещением 15 000—18 000 т при грузоподъемности 10 000—12 000 т и нескольких значениях мощности механизмов¹. Рассматриваемое судно имеет следующие главные размеры (в метрах):

Длина между перпендикулярами	138,0
Ширина	19,2
Высота борта	10,4
Осадка	8,5

По мощности механизмов, равной $N = 2000$; 4000; 6000 л. с., составляемые варианты нефтевоза распадаются на три группы. В пределах каждой группы были рассмотрены пять вариантов судна с коэффициентом общей полноты и водоизмещением, варьируемыми в пределах $\lambda = 0,66—0,79$ и $D = 15\ 200—18\ 000$ т. Соответствующая им скорость — эксплуатационная и на испытаниях в прямом рейсе и наибольшем переделе — определялась с учетом результатов, полученных при испытании трех моделей нефтевоза в бассейне.

Продуктивность рейса по каждому варианту судна была определена исходя из дальности плавания в 10 000 миль. При подсчете эксплуатационных расходов в основу принимались префиску-

¹ Материалы по рассматриваемому судну, использование в настоящем параграфе, заимствованы из работы Ленинградского кораблестроительного института «Анализ типа нефтевоза грузоподъемностью 10 000—12 000 т», выполненной И. Е. Антолевым, Г. В. Давиденком и А. И. Неродовым в 1954 г. под руководством автора.

Нагрузки на валовые нефтяные грузоподъемностью 10 000—12 000 м

Возра	N = 2000 л. с. при 5			N = 4000 л. с. при 5			N = 6000 л. с. при 5		
	0,600	0,704	0,715	0,690	0,704	0,715	0,690	0,704	0,715
$P_{\text{вн}}$	5 200	3 285	3 320	3 268	3 425	3 435	3 200	3 280	3 345
$P_{\text{тв}}$	860	860	860	860	860	860	860	860	860
$P_{\text{в}}$	210	240	240	240	385	385	310	310	310
$P_{\text{г}}$	780	800	810	820	1 000	1 000	1 270	1 310	1 360
$P_{\text{г}}^*$	110	110	110	110	110	110	110	110	110
$P_{\text{д}}$	300	300	300	300	300	300	300	300	300
$D_0 = D - P$	5 460	3 593	3 620	3 710	5 700	5 680	6 120	6 270	6 440
P	9 700	10 660	11 480	12 140	9 350	10 200	11 040	11 830	12 440
D	15 160	14 280	13 100	17 680	18 030	15 190	17 450	18 000	17 620
$V = \frac{P}{D}$	0,639	0,667	0,670	0,677	0,690	0,693	0,683	0,698	0,691

рантные цены на топливо. Приведенные ниже данные по себестоимости перевозки груза определены по формуле

$$q' = q + \alpha k, \quad (241)$$

в которой нормативный коэффициент α принят равным 0,15.

Данные об укрупненных расходах на грузы рассматриваемых вариантов судна приведены в табл. 44, а на рис. 59 сопоставлены

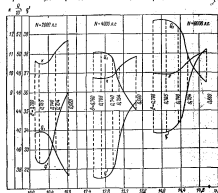


Рис. 59. Экономические показатели нефтяного грузоподъемностью 10 000—12 000 м.

результаты расчетов провозной способности Q_1 в тоннах, удельных капитальных затрат $K = \frac{K}{Q_1}$ и себестоимости перевозки одной тонны груза в рублях. Кривые построены в функции скорости на испытаниях.

Из рис. 59 следует, что при одинаковом коэффициенте общей полезности судна с мощностью механизмов $N = 4000$ л. с. соответствуют наименьшие удельные капитальные затраты и наи-

меняется себестоимость перевозки груза. При увеличении мощности механизмов до $N = 6000$ л. с. удельные капитальные затраты возрастают незначительно. В большей степени возрастает себестоимость перевозки груза, однако значительно увеличивается также провозная способность судна.

Наиболее выгодные значения коэффициента общей полноты в зависимости от мощности механизмов оказались равными

N	2000	4000	6000
δ	0,75	0,77	0,78

Однако, учитывая погрешности расчетов, можно считать, что во всех случаях $\delta = 0,77 \pm 0,01$.

Исходя из эмпирической формулы $\delta_{\text{н}} = 1,08 - 1,68 P$ следовало бы принять для нефтяного судна следующие значения коэффициента общей полноты:

N	2000	4000	6000
δ	0,83	0,78	0,77

Цифра $\delta = 0,83$ заведомо завышена, поскольку при таком коэффициенте полноты скорость судна резко снижалась бы на возмущаемом море. Две другие цифры незначительно отличаются от цифр, полученных детальным расчетом, однако характер зависимости $\delta = f(N)$ в рассматриваемых случаях различен.

Рис. 60. Зависимость себестоимости перевозки груза от скорости судна при различных значениях коэффициента общей полноты.

Уместно также отметить, что результаты, к которым приводит детальные расчеты в отношении наиболее выгодных δ и $v_{\text{опт}}$, не зависят от принятого значения коэффициента α в формуле (241). В интересном случае оптимальной по себестоимости перевозки груза и капитальным затратам оказалась скорость $v = 12,5$ узла при $N = 4000$ л. с. Эта цифра не дает представления о действительной оптимальной скорости судна рассматриваемого типа, так как при одинаковых значениях коэффициента общей полноты грузоподъемности совокупных вариантов уменьшается с увеличением мощности механизмов. Для получения окончательного ответа на поставленный вопрос следовало бы уравнивать грузоподъемность судов, удовлетворяющих условиям $\delta = \text{const}$. Это привело бы к дифференциации главных размеров вариантов, отличающихся мощностью механизмов, и поставило бы более быстрые суда в лучшие условия.

Рассмотренная диаграмма использована на рис. 60 для построения кривых $q = f(v)$, соответствующих постоянным коэффициентам общей полноты $\delta = 0,66$ и $\delta = 0,79$, а также коэффициентам общей полноты, принимающим значения $\delta = 0,79; 0,72; 0,66$ при мощности механизмов $N = 2000; 4000; 6000$ л. с. Максимум этих кривых не располагается на одной вертикали.

Рис. 60 иллюстрирует полученный ранее вывод (см. § 4 главы девяти), согласно которому наиболее выгодные значения экономических показателей судна зависят как от скорости хода, так и от коэффициента общей полноты. Поэтому, как отмечалось, при применении метода вариаций оптимальные v и δ должны определяться совместно.

§ 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СУХОГРУЗНОГО СУДА ДЕЙСТВИЕМ 4200—5400 т НЕФТЕВОЗА ВОДОЗАМЕЩЕНИЕМ 32 000—40 000 т

Рассмотрим типичные данные, полученные при определении элементов шельдерного сухогрузного судна с действом, взвешиваемым в пределах 4200—5400 т. Соответствующие расчеты, основанные на способе постоянных главных размеров, были выполнены в двух предположениях о мощности механизмов и скорости хода, а именно при $N = \text{const}$ и $v = \text{const}$.

Для всех вариантов судна были приняты одинаковые главные размеры, выраженные следующими цифрами (в метрах):

Длина между перпендикулярами	104,00
Ширину	15,60
Высота борта	9,30
Средняя	6,35

Основным считается вариант, который может быть охарактеризован такими показателями:

Водоизмещение	7070 т
Действ.	4933 т
Чистая грузоподъемность	4300 т
Мощность механизмов	3450 л. с.
Коэффициент общей полноты	0,66
» продольной полноты	0,69

Элементами остальных вариантов судна определялись в предположении, что коэффициент общей полноты принимает значения $\delta = 0,62; 0,65; 0,71; 0,74$. Для каждого из них задана релаксация при трех значениях мощности механизмов: $N = 2960, 3450, 3950$ л. с.

Сопротивление движению судна на тихой воде во всех случаях определялось в соответствии с данными испытаний моделей «Сери 60» Тода, а влияние гидрометеорологических условий — по

¹ Использование данных зависимость из дипломного проекта студента ЛКН В. С. Аксолова. Проект разработан под руководством автора.

графикам Аэртессена. На основе этих данных были построены вспомогательные диаграммы $N = f(\beta, v_{sk})$ и $N = f(\beta, v_{sk})$, которые позволили определять скорости хода, соответствующие выбранным значениям мощности механизмов, и мощность механизмов, соответствующую выбранным значениям скорости хода.

Технические и экономические показатели судна определялись для кругового рейса с пробегом (в милях):

Барра — Порт Савд . . . 970
Порт Савд — Касабланка . . . 2220
Касабланка — Марсель . . . 990
Марсель — Неволь . . . 460
Неволь — Барра . . . 1260

Итого . . . 6900

На рис. 61 представлены кривые $Q; P_1; v_{sk} = f(\beta)$, полученные для трех рассмотренных мощностей механизмов. Во всех случаях наиболее выгодным по провальной способности и относительному весу топлива, а следовательно и по другим экономическим показателям оказался вариант судна с коэффициентом общей полноты $\lambda = 0,71$.

Кривые $Q; q'; k; N; v_{sk} = f(\beta)$ на рис. 62 построены для постоянной скорости на испытаниях $v_k = 14,5$ узла. При определении ординат кривой себестоимости перевозок груза q' предполагалось, что капитальные затраты окупаются за протяжении 8 лет. Рисунок показывает, что при новой постановке задачи наиболее выгодным оказался вариант судна с коэффициентом общей полноты $\lambda = 0,68$. Эти цифры совпадают приблизительно со значениями коэффициента общей полноты, к которым приводят известные эмпирические формулы.

Приняв за 100% значения показателей судна, соответствующие $\lambda = 0,68$, можно охарактеризовать дальнейшие изменения коэффи-

циента общей полноты следующими цифрами (в процентах):

λ	0,62	0,63	0,68	0,71	0,74
v_{sk}	107,7	106,6	100	97,3	91,8
Q	94,4	97,7	100	102,2	101,8
k	102,3	100,2	100	100,3	100,6
q'	102,6	100,5	100	100,5	100,0

Эти данные показывают, что в интервале изменений коэффициента общей полноты $\lambda = 0,65-0,71$ экономические показатели судна изменяются очень медленно. Сказанное относится в первую очередь к удельным капитальным затратам и себестоимости перевозки груза.

Не останавливаясь подробно на других показателях судна, отметим лишь, что удельная вместимость судна изменяется для рассмотренных вариантов от $\mu = 1,7 \text{ м}^3/\text{м}$ до $\mu = 2,1 \text{ м}^3/\text{м}$, считая по тарному грузу. Нестабильность удельной вместимости объясняется тем, что во всех случаях высота борта считалась неизменной.

В заключение известно подчеркнуть, что в соответствии с заданиями на разработку проекта, диаграмма на рис. 62 построена для постоянной скорости на испытаниях. Логичнее было бы исходить из постоянной эксплуатационной скорости, однако, как показывают прикладные расчеты, такое изменение исходной предпосылки не оказало бы существенного влияния на общий характер кривых.

Данные по второму из рассматриваемых судов заимствованы из работы Лемиса [60]. Они относятся к судну со следующими элементами (в метрах):

Длина между перпендикулярами	180,0
Ширина	25,6
Высота борта	13,4
Средняя	10,1

В работе были рассмотрены варианты судна, отличающиеся мощностью механизмов и имеющие следующие коэффициенты общей полноты и водозаимчивости:

λ	0,72	0,76	0,80	0,84
N	32 400	36 100	38 000	39 900

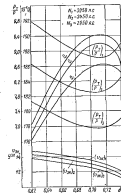


Рис. 61. Технико-экономические показатели судна длиной 4200—5400 м при $N = \text{const}$.

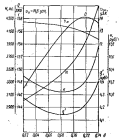


Рис. 62. Технико-экономические показатели судна длиной 4200—5400 м при $v_k = \text{const}$.

Результаты расчетов, в виде кривых себестоимости перевозки 1000 тонно-миль груза (в долларах) в функции коэффициента общей полноты, приведены на рис. 63. В верхней части этой диаграммы расположены кривые, построенные при постоянной мощности механизмов. Их ординаты монотонно убывают с увеличением коэффициента общей полноты. Кривые же, построенные при постоянной скорости, на испытаниях имеют минимумы.

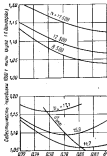


Рис. 63. Себестоимость перевозки груза на оптимальном водоизмещении 32 000—60 000 т.

Оптимальные значения коэффициента общей полноты (если $v_k = \text{const}$) по расчету и уже использованной ранее эмпирической формуле приведены ниже. При определении коэффициента k по эмпирической формуле первый ее коэффициент был увеличен до 1,11, поскольку она относится только к скорости на испытаниях.

P_k	0,178	0,183	0,208
По Леску	0,80	0,78	0,76
« формуле	0,81	0,79	0,76

Приведенные данные показывают, что цифры, полученные детальным расчетом при $v_k = \text{const}$ и по эмпирической формуле, мало отличаются друг от друга. Следует, однако, отметить, что результаты, полученные Лескусом, не вполне показательны, так как в расчетах не принималось во внимание падение скорости в реальных условиях плавания.

§ 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СУХОГРУЗОВОГО СУДА НА ГРУЗОПОДЪЕМНОСТЬЮ 10 000—12 000 т

Вопрос об определении элементов сухогрузного судна грузоподъемностью 10 000—12 000 т способом постоянного водоизмещения и постоянных главных размеров излагается в настоящем параграфе в соответствии с результатами, полученными в работе, выполненной автором совместно с Ю. Н. Поповым¹.

Расчеты, выполненные в работе, имели целью выявить как влияет постановка задач и некоторые расчетные предположения

на результаты, получаемые методом вариаций. Расчеты относятся к трем судам, рассмотренным в нескольких модификациях, которые присвоены шифры А-1, А-2, А-3, В, С-1, С-2. Из вариантов, рассмотренных по каждой модификации, основным считается вариант с коэффициентом общей полноты $k = 0,65$ и отношением длины к ширине $\frac{L}{B} = 7,25$.

При применении способа постоянного водоизмещения грузоподъемности всех вариантов судна была принята одинаковой и равной 10 800 т. Эксплуатационная скорость судов типа А равня 18,1 узла. Скорость же судов В и С была снижена соответственно до 14,4 и 14,1 узла². В исследованных способом постоянных главных размеров приведенные цифры действительны лишь для основного варианта судна.

Основной вариант судна А-1 по элементам и нагрузке мало отличается от турбохода «Ленинский комсомола», который был использован в качестве прототипа. При определении элементов отдельных вариантов этого судна относительный диаметр винта принимался постоянным ($\frac{d}{T} = 0,7$). Это допущение оказалось благоприятно на пропульсивном коэффициенте вариантов, отличающихся большей осадкой.

Влияние гидрометеорологических условий плавания на эксплуатационную скорость вариантов судна, с учетом их длины и коэффициента общей полноты, определялось по Азрессену [50]. При этом сила ветра принималась равной 4 балла. Предполагалось, что получаемые цифры соответствуют средним условиям плавания в Северной Атлантике. Обращение корпуса не принималось во внимание.

Для судна А-2 поправки, учитывающие влияние гидрометеорологических условий, были снижены вдвое по сравнению с судном А-1. Значение эксплуатационной скорости, полученное таким путем, соответствует приблизительно средним условиям плавания в Южной Атлантике летом. При определении элементов судна А-3 были приняты те же поправки, что и для судна А-1, но коэффициент полезного действия винта предполагался постоянным.

Для основного варианта судна В, как и для судна А-1, была принята машинная установка мощностью 13 000 л. с. Тем же цифрами учитывалось влияние гидрометеорологических условий и так же определялся коэффициент полезного действия гребного винта. Дополнительно, однако, были внесены поправки, учитывающие обращение корпуса. С целью получения более наглядных результатов было принято высокое значение коэффициента обращения корпуса $k_{об} = 2,8 \cdot 10^{-2}$, соответствующее по Е. В. Леску 10-месячному плаванию при посещении портов, в которых обраста-

¹ См. доклад Л. М. Попова и Ю. Н. Попова на технической конференции ЛКМ в 1962 г.

² Скорость хода на испытаниях судно А и В была одинаковой.

ние интенсивно. Для основного варианта судна В был принят такой же запас топлива, как и для основного варианта А-1.

Элементы вариантов судна С-1 определялись в предположении, что диаметр винта во всех случаях равен 70% от осадки. Для вариантов судна С-2 коэффициент полезного действия винта был принят постоянным. В остальном суда С-1 и С-2 по расчетным предположкам не отличаются от судна А-1.

Вследствие снижения скорости хода мощность машинной установки основных вариантов судов С-1 и С-2 снижалась с 13 000 до 5000 л. с.

Суммируя изложенное, можно охарактеризовать рассматриваемые модификации судна следующими данными¹:

Судно	А-1	А-2	А-3	В	С-1	С-2
$v_{\text{вк}}$	18,1	18,1	18,1	14,4	14,1	14,1
$\Delta v/v_{\text{вк}}$	max	min	max	max	max	max
$t_{\text{вд}}$	—	—	—	$2,8 \cdot 10^{-3}$	—	—
d/T	0,7	0,7	var	0,7	0,7	var
ρ	var	var	const	var	var	const

При определении мощности механизмов сопротивление воды подсчитывалось по данным испытаний моделей в акрии 60х Тодда. В расчетах нагрузки вес корпуса пересчитывался по прототипу с использованием графиков Рабена. Вес же оборудования пересчитывался общепринятыми в отечественной практике способами.

Для всех вариантов были приняты одинаковые отношения $\frac{R}{T} = 2,5$ и (для случая $P = \text{const}$) $\frac{N}{T} = 1,47$, а также одинаковая относительная длина надстроек. При $P \neq \text{const}$ величина надводного борта по отдельным вариантам судна пересчитывалась исходя из требования сохранения постоянной удельной вместимости трюмов. Связанное с этим увеличение веса корпуса учитывалось в нагрузке.

Применение метода вариаций при фиксированной грузоподъемности судна. На рис. 64 для судна А-1 приведена диаграмма с кривыми D_0 : $N = f\left(\lambda, \frac{1}{R}\right)$, где $D_0 = D - P$. Пунктирные линии на диаграмме построены по цифрам, полученным во втором приближении. Они показывают, что расчеты первого приближения не требуют дальнейших уточнений. При построении ограничивающих кривых было условно принято, что длина судна по условиям общего расположения должна быть не менее 158 м, а осадка — не более 8,8 м. Ограничивающие кривые по удельной вместимости трюмов не строились, так как при переменной мощности механизмов трудно с достаточной точностью определить необходимую длину машинных отделений.

¹ Под максимальными и минимальными значениями $\Delta v/v_{\text{вк}}$ понимаются соответственно падение скорости, соответствующее четырехкратному ветру и падение скорости, выраженное в два раза меньшими цифрами.

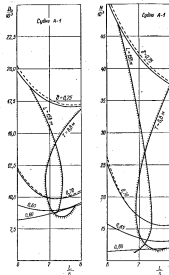


Рис. 64. Варианты судна А-1 ($P = \text{const}$; $v_{\text{вк}} = \text{const}$).

Определяя элементы судна А-1 с помощью общепринятых эмпирических формул, мы получим бы при фиксированных грузоподъемности, скорости хода и дальности плавания $\bar{\lambda} = 0,65-0,66$ и $\frac{L}{B} = 7,1-7,2$.¹ Руководствуясь же диаграммой, следовало бы признать, что для уменьшения водоизмещения и мощности механизмов целесообразно принять минимальные из рассмотренных значений коэффициента общей полноты, равное $\delta = 0,60$. При этом коэффициент полноты водоизмещения и мощность механизмов монотонно убывают по мере уменьшения отношения L/B .

Аналогичные диаграммы Фан построены при более мягких предположениях о гидрометеорологических условиях (судно А-2) и в предположении возможности коэффициента полезного действия винта (судно А-3). Кривые для коэффициентов $\bar{\lambda} = 0,65$ и $\bar{\lambda} = 0,75$, снятые с этих диаграмм, сопоставлены на рис. 65 с аналогичными кривыми, перенесенными с рис. 64.

Из рис. 65 очевидно, что смягчение расчетных предположений о гидрометеорологических условиях плавания и изменение способа определения пропульсивного коэффициента не оказывают существенного влияния на кривые $D_0; N = f\left(\frac{L}{B}\right)$ при малых значениях коэффициента $\bar{\lambda}$. При больших же значениях этого коэффициента кривые, соответствующие различным исходным данным, значительно отличаются друг от друга как формой, так и расположением на поле диаграммы. Поэтому, при известных условиях, изменение исходных предположек может оказать существенное влияние на выводы, вытекающие из расчетов.

При значении коэффициента общей полноты, превышающих $\bar{\lambda} = 0,65$, коэффициент полезного действия гребного винта варьирован судна А-1 убывает вследствие уменьшения их осадки. Поэтому рассматриваемые кривые судна А-3, не подчиняющегося этой закономерности, ложатся ниже кривых судна А-1.

Несмотря на различия сопоставляемых диаграмм, они характерны одной общей закономерностью. Она заключается в том, что для всех трех судов водоизмещение и мощность механизмов достигают минимальных значений при значениях из рассмотренных в расчетах значений коэффициента $\bar{\lambda}$ и отношения L/B .

На рис. 66 приведены кривые $D_0; N = f\left(\frac{L}{B}\right)$, построенные для судна В, элементы которого, как отмечалось, были определены при весьма жестких предположениях об обрастании корпуса. Несмотря на значительно меньшую скорость хода по сравнению с судном А, кривые $D_0; N = f\left(\frac{L}{B}\right)$ варьирован судна В с коэф-

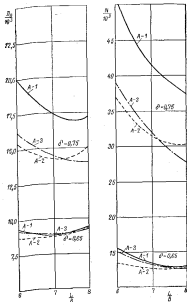


Рис. 65. Варианты судов А-1; А-2 и А-3 при $\bar{\lambda} = 0,65$ и $\bar{\lambda} = 0,75$ ($P = \text{const}$; $v_{\text{вк}} = \text{const}$).

¹ Судно-прототип «Ленинградский комсомолец» имеет коэффициент общей полноты, равный 0,553, и отношение длины к ширине, равное 7,16.

ценном общей полноты $\xi = 0,65$ мало отличаются от аналогичных кривых судна А-1. Однако вследствие относительной точности судна В изометрические коэффициенты ξ оказывают значительное влияние на его водоизмещение и мощность механизмов. Это обстоятельство показывает, что в процессе сарделления элементов проектируемого судна нужно учитывать реальные условия его эксплуатации, а не исходить из скорости судна на испытаниях.

При увеличении коэффициента ξ и отношения L/B водоизмещение и мощность механизмов вариантов судна В уменьшаются, подобно тому, как это было отмечено для судов типа А.

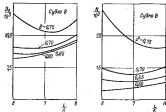


Рис. 66. Варианты судна В ($P = \text{const}$; $v_{\text{из}} = \text{const}$).

Кривые $D_{\text{в}}$, $N = f\left(\frac{L}{B}\right)$ судна С-1 приложены на рис. 67. Там же для сравнения нанесены пунктиром аналогичные кривые судна С-2 при $\xi = 0,65$ и $\xi = 0,75$. Основываясь на обычной практике, можно признать в качестве характерного значения коэффициента общей полноты для судна с дельтейн и скоростью хода как у рассматриваемого судна: $\xi = 0,75$. Минимуму же водоизмещения и мощности механизмов соответствует коэффициент $\xi = 0,60$. Следует также отметить, что для судов С-1 и С-2 минимумы кривых $D_{\text{в}}$, $N = f\left(\frac{L}{B}\right)$, соответствующих одинаковым коэффициентам общей полноты, не располагаются на одной вертикали.

Рассмотренные данные показывают, что при выборе коэффициента общей полноты и отношения длины к ширине нельзя ориентироваться на варианты судна с минимальным водоизмещением или минимальной мощностью механизмов. Приведенные значения искомым величинам могут быть обоснованы лишь путем нанесения гра-

фичирующих кривых на диаграмму, объединяющую результаты, полученные методом вариаций.

Для вариантов судна, найденных способом постоянного водоизмещения, экономические показатели не определялись. Можно, однако, утверждать, что они не изменили бы сформулированных

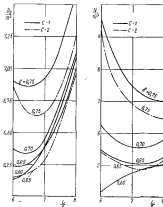


Рис. 67. Варианты судна С-1 и С-2 ($P = \text{const}$; $v_{\text{из}} = \text{const}$).

вые выводов, поскольку некоторые составляющие эксплуатационных расходов возрастают с увеличением водоизмещения, в то время как остальные составляющие возрастают с увеличением мощности механизмов.

Применение способа постоянных главных размеров судна. Вопрос о применении метода вариаций в предположении, что $P \neq \text{const}$, рассмотрен ниже на примере судна А-1 — при мощности механизмов в 13 000 л. с. и судна С-1 — при мощности механизмов

в 5000 д. с. Для каждого из этих судов задано решалась применительно к трем соотношениям главных размерений, соответствующих трем значениям отношения L/B . Главные размерения рассмотренных вариантов судна приведены в табл. 45, а их важнейшие показатели сопоставлены на рис. 68 и 69 (размерности показателей $[Q] = \text{кг}$; $[\delta] = [\eta] = \frac{\text{мкс}}{\text{м} \cdot \text{мкс}}$).

Таблица 45

Главные размерения вариантов судов А-1 и С-1

$\frac{L}{B}$	Судно А-1			Судно С-1		
	L	B	T	L	B	T
6,50	196,5	22,5	9,05	129,3	21,5	8,69
7,25	157,5	21,7	8,72	100,6	20,7	8,34
7,50	166,0	21,4	8,58	158,0	20,4	8,22

Из рис. 68 следует, что оптимальные значения коэффициента общей полноты судна А-1 $\delta = 0,70-0,71$ при $P = 12\ 000$ м и $\sigma_{\text{мк}} = 17,1-17,0$ (если принять $\frac{L}{B} = 7,25$). Для такой эксплуатационной скорости формула Эйра $\delta = 1,06-1,68 F_0$ приводит к минимальному коэффициенту полноты $\delta = 0,68$.

Для судна С-1 график на рис. 69 приводит к оптимальному значению коэффициента общей полноты $\delta = 0,75-0,77$ при $P = 13\ 100$ м и $\sigma_{\text{мк}} = 12,2-12,0$ узла, если принять значение отношения L/B промежуточное между $\frac{L}{B} = 6,50$ и $\frac{L}{B} = 7,25$. Для этих скоростей формула Эйра дает $\delta = 0,79$. Увеличение коэффициента полноты до этой цифры привело бы к дальнейшему снижению скорости хода, не оправданному улучшением экономических показателей судна.

Сопоставляя варианты судов А и С, отличающиеся отношением L/B , можно убедиться, что минимум провозной способности и минимум относительного расхода топлива наступают при небольших из рассмотренных значений этого отношения. Наиболее низким значениям отношения L/B соответствует минимум капиталовложений. Минимум себестоимости перевозок груза наступает при промежуточных значениях отношения L/B , однако разница в цифрах, соответствующих отдельным вариантам, — незначительна. Так, для судна А при $\delta = 0,70$ и судна С при $\delta = 0,75$ себестоимость перевозок 1 т груза на протяжении 1 мили пути выражается следующими цифрами (в копейках):

Отношение $\frac{L}{B}$	6,5	7,25	7,75
д для судна А	0,111	0,109	0,118
с " " " С	0,0885	0,0895	0,0889

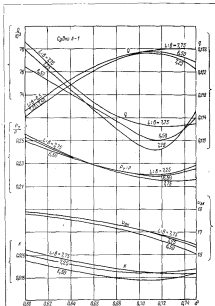


Рис. 68. Варианты судна А-1 ($N = \text{const}$; $P + \text{const}$).

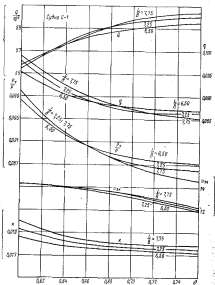


Рис. 69. Варианты судна С-1 ($N = 0.04$; $P \neq 0.02$).

Из этих данных нельзя сделать каких-либо определенных выводов о наиболее выгодных значениях отношения L/B , поскольку при определении стоимости корпуса влияние изменения соотношений элементов, в соответствии с обычной практикой, не учитывалось, а погрешность расчетов превышает отклонения от средних цифр.

На рис. 70 для судна С-1 при $\frac{L}{B} = 6.5$ приведены кривые способности перевозки груза, построенные с учетом стоимости груза. Кривые ϕ , ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 , ϕ_4 построены соответственно для стоимости груза 0; 20; 50; 100; 200 руб./м. Из диаграммы следует, что с увеличением стоимости груза оптимальное значение коэффициента δ уменьшается. Для судна А-1 учет стоимости груза не приводит к столь резкому смещению минимума на кривых способности перевозки. Все же представляется целесообразным при проектировании судов, предназначенных для перевозки более дорогих генеральных грузов, принимать меньшие значения коэффициента общей полноты, чем для судов, перевозящих дешевые массовые грузы.

Определение оптимальных сочетаний коэффициентов δ и скорости $v_{\text{опт}}$ графоаналитическим и графическим способами. Графоаналитический способ (см. [32] и § 1) использован на рис. 71 и 72 для нахождения оптимальных значений δ и $v_{\text{опт}}$ судов А-1 и С-1 при $\tau_{\text{ог}} \approx 0$. Кривые $M_{\text{в}}$ и $M_{\text{д}}$, точка пересечения которых определяет положение искомых значений, построены: первая — для двух значений отношения $\Delta\phi/\phi_{\text{оп}}$, а вторая — для трех значений коэффициента $\kappa = \frac{D_{\text{огр}}}{v_{\text{огр}}} = (1 - \tau_{\text{ог}}) \delta$. Средние кривые $M_{\text{д}}$, подставленные для $\kappa = 0.207$ и $\kappa = 0.200$, соответствуют действительной нагрузке рассматриваемых судов.

Диаграммы показывают, что изменение коэффициента κ на $\pm 5\%$ (чему соответствует $\Delta\kappa \approx \pm 0.01$) не оказывает заметного влияния на положение искомой точки. Сильнее сказывается изменение отношения $\Delta\phi/\phi_{\text{оп}}$ в пределах, имеющих практическое значение.

На диаграммах нанесены также кривые $P_{\text{д}}/P$ и Q , полученные с помощью численных расчетов в предположении, что $D_{\text{огр}} = \text{const}$

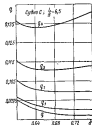


Рис. 70. Способность перевозки груза на судне С-1 при отношении $L/B = 6.5$ в зависимости от коэффициента δ с учетом стоимости груза.

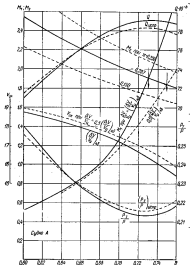


Рис. 71. Показатели судна А-1.

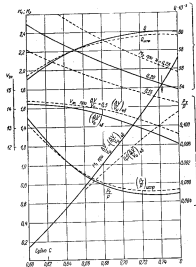


Рис. 72. Показатели судна С.

(сплошными линиями) и с учетом влияния изменения коэффициента обшей полноты и высоты борта на вес стального корпуса (пунктирными линиями). Эти кривые показывают, что пренебрежение влиянием изменения веса корпуса не вносит в результаты заметной погрешности.

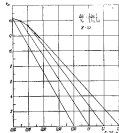


Рис. 73. Определение оптимальных значений коэффициента обшей полноты и эксплуатационной скорости хода судна С графоаналитическим способом.

шений, принятых при оценке падения скорости судна в море. Сказанное может быть иллюстрировано приведенными ниже данными по теплоходу грузоподъемностью 6000 м, для которого, в отличие от судов, рассмотренных в предыдущем параграфе, мощность механизма определялась по графикам Эбра¹. Иначе учитывалось также влияние гидрометеорологических условий на скорость судна в средних условиях эксплуатации. Эти особенности став привели к изменению характера кривых D_0 ; $N = \dots$

Элементы рассматриваемого судна определялись способом постоянного возмещения. Эксплуатационная скорость хода была принята равной 14 узлам, а дальность плавания — 3000 миль. Коэффициент полезного действия винта считался постоянным и равным 0,65. Неизменными были приняты также отношения $\frac{D}{T} = 2,5$

¹ Способ Эбра широко применялся при определении элементов транспортных судов еще в первой половине 50-х годов, когда весьма было распространено для определения сопротивления воды подбодными данными серийных испытаний моделей.

§ 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СУХОГРУЗНОГО СУДНА ГРУЗОПОДЪЕМНОСТЬЮ 6000 т

В § 9 предыдущей главы указывалось, что вид кривых, выражающих технико-экономические показатели вариантов судна в функции соотношений его элементов, в значительной мере зависит от способа, которым определены сопротивление воды, и допущений, принятых при оценке падения скорости судна в море.

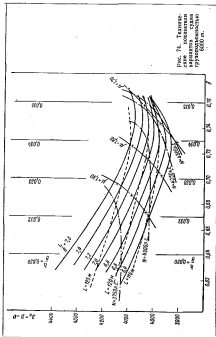


Рис. 74. Технические показатели вариантов судна грузоподъемностью 6000 т.

и $\frac{N}{P} = 1,46$. Приемлемыми пределами изменения удельной мощности трюмов считались $\mu = 1,8-1,9 \text{ м}^3/\text{м}$.

Кривые $D_0 = D - P = f\left(\xi, \frac{L}{B}\right)$ рассматриваемого судна с наклонными N ; A/B ; μ ; L — совмещены на рис. 74. В отличие от аналитических кривых, приведенных в предыдущем параграфе, в настоящем случае водоизмещение судна не возрастает монотонно

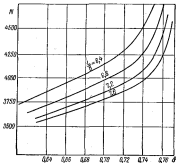


Рис. 75. Мощность механизмов вариантов судна с чистой грузоподъемностью 6000 т.

с увеличением коэффициента общей полноты, а достигает минимума при $\xi = 0,73-0,75$, в зависимости от отношения длины судна к ширине¹. Этот результат объясняется тем, что в настоящем случае мощность механизмов, рассчитанная по Эйру при менее суровых предположениях о падении скорости на волнении, возрастает медленнее с увеличением полноты судна. Сказалось и известной мере и другое распределение веса, входящих в нагрузку.

¹ Такой же характер имеют кривые, приведенные на рис. 52 в курсе [26].

Для изнесения изолиний, показанных на рис. 72, строились предварительно вспомогательные диаграммы, одна из которых с кривыми $N = f\left(\xi, \frac{L}{B}\right)$ приведена на рис. 75. На таких вспомогательных диаграммах проводят горизонтальные линии, соответствующие постоянным значениям рассматриваемого показателя (в настоящем случае $N = 3750, 4000, 4250, 4500 \text{ л. с.}$), и замечают,

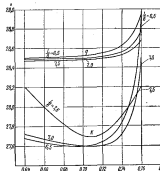


Рис. 76. Экономические показатели вариантов судна грузоподъемностью 6000 т.

при каких сочетаниях коэффициента ξ и отношения L/B они могут быть реализованы. После этого найденные точки переносят на сподвижную диаграмму.

На рис. 76 приводятся кривые себестоимости перевозки груза и удельных капитальных затрат рассматриваемого судна. Последние имеют экстремальные точки, в то время как для вариантов судна, рассмотренных в предыдущем параграфе, себестоимость перевозки груза и удельные капитальные затраты монотонно возрастают с увеличением коэффициента общей полноты и отношения длины к ширине.

§ 7. ПРИМЕР ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕСОВОЗА

Рассмотрим в качестве примера данные¹, полученные при определении элементов лесовоза грузоподъемностью 5100 м с помощью способа постоянного водоизмещения. Прототипом при выполнении расчетов был выбран реальный лесовоз с той же грузоподъемностью. Незначительны по прототипу были оставлены приближения $\Delta Z_0 = 0,96$ м, длина плавника, основные измерители веса корпуса, а также машинная установка.

В отличие от прототипа в основу расчетов было принято судно с наклонными бортами и двойным дном, повышенным на 0,4 м. Кроме того, в рейсах с зерном топливом разнилось в центрах с вышерасположенным центром тяжести объема, чем на прототипном лесном перевозчике.

При определении элементов нового лесовоза рассматривались варианты судна, отличающиеся коэффициентом δ и отношением L/B . Отношения же B/T и H/T были получены с помощью уравнений устойчивости и найденного борта исходя из принятых значений K' и K'' и в соответствии с правилами о грузовой марке. Главные размеры вариантов приведены в табл. 46.

Таблица 46

Главные размеры вариантов лесовоза

Элементы	$\frac{L}{B} = 6,5$ при δ				$\frac{L}{B} = 7,0$ при δ				$\frac{L}{B} = 7,5$ при δ			
	0,65	0,70	0,75	0,80	0,65	0,70	0,75	0,80	0,65	0,70	0,75	0,80
L м	112,3	111,0	106,8	102,0	120,0	118,0	113,0	108,0	127,0	125,0	119,0	114,0
B м	17,3	16,5	16,2	15,8	17,1	16,5	16,0	15,5	17,0	16,3	15,5	15,0
H м	8,60	8,25	8,15	7,96	8,86	8,50	8,37	8,18	9,17	8,75	8,45	8,25
T м	7,51	7,14	7,05	6,90	7,89	7,52	7,40	7,24	8,21	7,77	7,45	7,15
T_0 м	7,37	7,04	6,90	6,75	7,73	7,35	7,23	7,08	7,99	7,55	7,27	7,00

Полученные результаты представим на рис. 77 и 78 в виде кривых D ; $v_{\text{кр}}$; ρ_0 ; P_0 ; $q = f\left(\delta, \frac{L}{B}\right)$. На диаграммах отмечена также ограничивающая кривая, соответствующая осадке $T = 7,0$ м.

Приведенные данные были получены для рейсов с лесом, имеющим удельные погруженные кубатуры $\frac{V_{12}}{P_{10}} = 2,16$ м³/т, $\rho_0 = 2,32$ м³/т, в предположении, что обратные рейсы совершаются в балласте.

Диаграммы показывают, что с увеличением коэффициента δ и уменьшением отношения L/B скорость судна и его удельная вместимость ρ_0 падает, а вес балласта возрастает. При этом, вследствие уменьшения скорости хода и веса лесного груза, произведе-

способности судна снижается. Одновременно, несмотря на уменьшение веса корпуса, водоизмещения и стоимости судна, возрастает себестоимость перевозки груза.

В отношении последнего показателя следует отметить, что при увеличении коэффициента общей полноты в пределах от $\delta = 0,65$

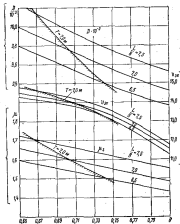


Рис. 77. Технические показатели лесовоза.

до $\delta = 0,73$ себестоимость перевозки груза возросла лишь на 2%. Эта цифра не превосходит погрешности расчетов, и которых, в соответствии с обычной практикой подобных исследований, стоимость судна определялась по весовым соотношениям без учета влияния изменения размеров судна на трудоемкость корпусных работ. Учитывая это обстоятельство, можно считать, что кривые, характеризующие себестоимость перевозки груза при малых коэффициентах δ

¹ Расчеты были выполнены студенткой ЛКИ Г. Д. Барановой.

и больших значениях L/B , несколько занижены. Возможно, что более точные расчеты выявили бы наличие минимума на кривых $q = f(B)$ в обследованном интервале значений коэффициента λ .

Нижне один из вариантов лесовоза сопоставлен с судном-прототипом, причем в обоих случаях удельная грузоподъемная кубатура

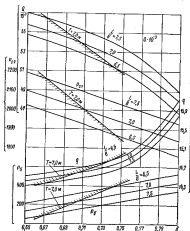


Рис. 78. Технические и экономические показатели лесовоза.

леса $\frac{V_{то}}{P_{то}}$ принята одинаковой и равной $2,32 \text{ м}^3/\text{т}$ (вместо $2,16 \text{ м}^3/\text{т}$ в предыдущих расчетах). Изменение метрической высоты $\Delta h = h' - h''$ также принято одинаковым для обоих судов.

Элементы и показатели сопоставляемых судов выражаются следующими цифрами:

	L	D_0	D_2	H	T_0	T_2	λ	β
Прототип . . .	113	16,7	18,7	8,30	6,75	7,0	0,709	0,96
Вариант . . .	121	18,5	19,7	8,33	6,85	7,0	0,686	0,94
	$\frac{L}{B}$	λ	D_0	D_2	P_0	P_2	P_4	η_2
Прототип . . .	6,77	—	9200	9900	500	6130	5900	1,54
Вариант . . .	7,25	10 ³	9340	9900	230	5100	5430	1,66

Преимуществами рассматриваемого варианта лесовоза по сравнению с прототипом являются меньший вес балласта и более высокая грузоподъемность при перевозке леса. К числу его недостатков следует отнести возросшие длину и водоизмещение. Снижение веса балласта на 270 т для варианта лесовоза обусловлено изменениями проекта судна-прототипа, каждому из которых соответствуют следующие изменения веса балласта (в тоннах):

Увеличение удельной вместимости трюма	150
Применение козырьков метаметра на 6 см	60
Сокращение полезного объема трюма	20
Дублирование топливных цистерн	40

Итого 270

Чтобы получить возможность выбрать конкретное решение, следовало бы определить экономические показатели сопоставляемых вариантов судна по результатам эксплуатации за всю навигацию с учетом числа рейсов, совершенных с грузами леса и зерна.

Рассмотренные материалы иллюстрируют способ определения элементов лесовоза, развитый в § 2. В то же время они дают общее представление о влиянии различных факторов на вес балласта и экономические показатели судна. В частности, приведенные данные показывают, что применение наклонных бортов в подвальной части судна не дает существенного положительного эффекта, в соответствии с чем целесообразно проектировать лесовозы с развалом бортов лишь в надпалубной части, как это предлагается в работе [24].

§ 6. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ВАРИАЦИИ

В предыдущих параграфах были кратко рассмотрены некоторые исследования, выполненные при определении элементов сухогрузных и наливных судов. Эта и другие аналогичные работы позволили сформулировать в настоящем параграфе некоторые предварительные выводы по рассмотренным вопросам, требующие дальнейшего уточнения.

Как показано выше, в тех случаях, когда задача рассматривается в предположении, что мощность механизма является постоянной величиной, а грузоподъемность судна может меняться в некоторых пределах, оптимальное значение коэффициента общей полноты

зависит в основном от формы кривой $v_{\text{кр}} = f(\delta)$. Для судна длиной около 120 м эксплуатационная скорость хода снижается особенно резко при значениях коэффициента общей полноты, превышающих $\delta = 0,72-0,73$. Эти значения коэффициента общей полноты и соответствующие им числа Фруда ($Fr = 0,20$ — по эксплуатационной скорости и $Fr_{\text{кр}} = 0,21$ — по скорости на испытаниях) оказываются практически наиболее выгодными при рассматриваемых условиях для сухогрузных судов. Отмеченная закономерность обуславливается, с одной стороны, характером кривой $R = f(\delta)$ на тихой воде, а с другой, — влиянием на сопротивление гидрометеорологических условий, которые сказываются особенно резко при больших коэффициентах δ .

Поскольку в районе экстремальных точек кривые технико-экономических показателей судна изменяются медленно, можно принимать коэффициент общей полноты несколько меньшим его оптимального значения. Это позволяет увеличить скорость хода без существенного ухудшения технико-эксплуатационных качеств судна. По-видимому, при принятых предположениях можно считать экономически выгодными суда с коэффициентами общей полноты порядка 0,69-0,72, используемые при скоростях хода, соответствующих числам Фруда $Fr = 0,20-0,22$ и $Fr_{\text{кр}} = 0,21-0,23$.

Вероятно, при проектировании судов, предназначенных для перевозки дешевых массовых грузов, целесообразно приближаться к верхнему, а при проектировании судов, перевозящих генеральный груз, — к нижнему пределу отмеченных значений коэффициента δ .

С увеличением длины судна, влияние волнения на его ходкость снижается, вследствие чего значения оптимального коэффициента общей полноты получаются более высокими. Для очень крупных судов они могут превосходить $\delta = 0,8$. Очень высокие значения оптимального коэффициента δ получаются также в тех случаях, когда внешние условия исключают возможность образования значительного волнения. Так обстоит дело с речными судами и морскими обитаемыми судами, плавающими в закрытых бассейнах.

При определении коэффициента общей полноты нефтенавозов и других судов, перевозящих груз в одном направлении, необходимо учитывать, что в балластных перепадах они имеют меньшую осадку и меньший коэффициент полноты. Это обстоятельство приводит к более высоким значениям $\delta_{\text{кр}}$ для судна в полном грузу по сравнению с судном, перевозящим груз на протяжении всего рейса.

Если задача рассматривается при $v = \text{const}$ и $P \neq \text{const}$, оптимальный коэффициент полноты получается более низким, чем при переменной скорости. Расхождение между значениями этого коэффициента, полученными в двух отмеченных предположениях, тем больше, чем больше отличается заданная скорость хода от наиболее выгодной скорости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арханбоут—Шоккер, Нойвербург, Воссман, Проектирование торговых судов, перевод с английского, Судостроение, 1959.
2. Ариетт Д., Проектирование и постройка стальных торговых судов, Перевод с английского, Судостроение, 1959.
3. Балкашин А. И., Проектирование кораблей, Военмориздат, 1949.
4. Белоусовский М. А., К вопросу о построении диаграмм устойчивости по диаграммам протонов, «Судостроение», 1939, № 5.
5. Вайсбергский С. Н., О приближенной формуле Клауса для вычисления лямбда-особенности формы «морские судостроения», 1933, № 6.
6. Богуславский А. Н., Расчет диаграмм устойчивости в начальных стадиях проектирования, Труды ВНИИТ, вып. XXVIII, 1962.
7. Воклевский К. П., Курс проектирования судов, литографированное издание СПБ Политехнического института, 1904.
8. Волжский К. П., Новые идеи проф. А. П. Фандер-Фанта по вопросу прочности морских торговых судов, «Морской транспорт», 1934, № 1.
9. Губин И. Г., Об одном методе определения главных размеров судна, «Известия Союза морских инженеров», 1916, т. 1, Петроград.
10. Ванорадов И. В., Определение перепадами подкапитанов судна в форме эллиптической дельты, «Судостроение», 1961, № 2.
11. Клаус В. Т., Приближенная формула для вычисления лямбда-особенности формы, Труды ВНИИТ, вып. 3, 1932.
12. Дорие В. С., К. П. Воклевский и воспроизведение курса проектирования судов в Корпусостроительном институте, Труды ЛКИ, вып. XXV, 1959.
13. Дорие В. С., Об использовании дифференциальных уравнений веса, «Судостроение», 1959, № 7.
14. Ермаков А. П., Несколько соображений о проектировании судов для перевозки лесных грузов, «Судостроение», 1935, № 1.
15. Заботкин Н. А., Приближенные формулы для вычисления устойчивости судов на больших углах крена, «Судостроение», 1934, № 7.
16. Зегжа А. П., Теория волнения и методики расчета гидротехнических моделей, Гострансиздат, 1938.
17. Знаменский А. Б., Приближенное исследование диаграмм статической устойчивости, Труды ВНИИТСА, т. VI, вып. 2, 1955.
18. Жуков В. П., Тяги иностранных Атлантов, «Судостроение», № 4, 1916.
19. Коркин С. Ф., Вериштейн И. Л., Залеский Ю. Ф., Записка морского транспорта, Изд-во «Морской транспорт», 1959.
20. Киринцев М. В., Теория волнения, Изд-во АН СССР, 1933.
21. Ланте В. А., Основы проектирования морских торговых судов, ч. 1, 1932, ч. 2, 1933, ч. 3, 1935, ОГИИ—Гострансиздат.

32. Махиской Ю. А., Проектирование верслюковых установок военных верфей, Оборонгиз, 1959.
33. Мэй и Янг Д. Ч., Теория и практика проектирования верфей, перевод с английского, Военмориздат, 1960.
34. Митрошинченко Н. П., Голубев Ю. И. и др., Судно универсального назначения для перевозки леса, зерна, генеральных грузов и промышленного оборудования, «Судостроение», 1961, № 10.
35. Морской Регистр СССР, Правила классификации и постройки морских судов, 1956.
36. Ногид Л. М., Уравнение жесткости судостроительных судов, Труды ЛКИ, вып. VIII, 1951.
37. Ногид Л. М., Из истории развития теории проектирования судов, Труды ЛКИ, вып. XIV, 1964.
38. Ногид Л. М., Теория проектирования судов, Судпромгиз, 1955.
39. Ногид Л. М., Теория подобия и размерностей, Судпромгиз, 1959.
40. Ногид Л. М., Проектирование форм судна и построение теоретического чертежа, Судпромгиз, 1962.
41. Ногид Л. М., Жесткость судостроительных и военных судов, Труды ЛКИ, вып. XI, 1962.
42. Ногид Л. М., Наиболее выгодные сочетания коэффициента общей полноты и эксплуатационной скорости хода, «Судостроение», 1963, № 2.
43. Ногид Л. М., Об использовании метода подобия, «Судостроение», 1963, № 6.
44. Основы корабельной архитектуры, т. 1. Перевод с английского под редакцией Н. Е. Пугачева, Судпромгиз, 1948.
45. Пакратьев А. Ю., Коммерческая эксплуатация морского транспорта, Изд-во «Морской транспорт», 1955.
46. Подюкин В. Л., Некоторые приближенные формулы, применяемые при проектировании судов, «Технический флот», 1924, № 10—11.
47. Подюкин В. Л., Основы проектирования морских коммерческих судов, ЦБМС, ч. 1, 1926, ч. II, 1927.
48. Подюкин В. Л., Теория проектирования судов, Изд-во ЛКИ, вып. I, 1938, вып. II, 1939.
49. Подюкин В. Л., Приближенные формулы для расчета остойчивости судов на больших углах крена, Изд-во ЛКИ, 1939.
50. Регистр Соединенных Штатов, Нормы остойчивости морских и речных судов, Изд-во «Морской транспорт», 1963.
51. Седов Л. Н., Метод подобия и размерностей в механике, Гостехиздат, 1951.
52. Семенов В. А., Определение веса основного корпуса и надстроек морского коммерческого корабля по его главным элементам, Сб. «Теория и практика судостроения», вып. IV, 1950.
53. Семенов В. А., Шанский В. В., Планирование основных элементов корпуса корабля на его остойчивость, Судпромгиз, 1947.
54. Синилов В. М., Экономический анализ при проектировании морских судов, Судпромгиз, 1961.
55. Смирнов Б. Н., Проектирование корпусов военных судов из легкого сплава, «Судостроение», 1962, № 8.
56. Соколов Л. Г., Определение грузоподъемности судостроительных судов, «Судостроение», 1960, № 7.
57. Справочник по судостроению. Проектирование военных кораблей, т. 2, ч. 1, Оборонгиз, 1959.
58. Справочник по строительной механике корабля, т. 3, Судпромгиз, 1960.
59. Толоцкий Е. С., Использование главных элементов конструкции для определения грузоподъемности, Сб. «Теория и практика судостроения», т. I, 1927, т. II, 1928, т. III, 1930.
60. Aertsen G., The Effect of Weather on the Performance of Cargo

- Ships, Proceeding, Symposium on the Behaviour of Ships in a Seaway, September 1957, Wageningen.
61. Bostick H., The Ballasting of Cargo Ships, Transactions, North East Coast Institution of Engineers and Shipbuilders, 1941/42.
62. Bastard E. C., Preliminary Calculations in Ship Design, Transactions, North East Coast Institution of Engineers and Shipbuilders, 1943/44.
63. Comstock L. P., Survival of Collision Damage, Versus the 1960 Convention on Safety Life at Sea, Transaction, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1961.
64. Danckwardt E., Zusammenhang der Schiffabmessungen mit dem Laderauminhalt von Trockenfrachtern, «Schiffstechnik», 1963, № 4.
65. Hebecker O., Holz in Schiffsladung, «Schiff und Hafen», 1961, № 8.
66. Hebecker O., Stabilitäts- und Sicherheitsgrenze eines mit Holz beladenen Schiffes, «Schiff und Hafen», 1962, № 4.
67. Herzer H. und Verböckel R., Entwurf und Einrichtung von Handelschiffen, Leipzig, 1964.
68. Hovgaard W., General Design of Warships, 1920.
69. Johow — Foerster, Hilfsbuch für den Schiffbau, Bd. I—II, 1928.
70. Lewis E. V., Optimum Fullness for Deadweight Cargo Ships in Moderate-Weather Service, Journal of Ship Research, November 1957.
71. Powell S. C., Estimation of Machinery Weights, Transactions, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1958.
72. Puchatz K., Vorausbestimmung der Masse und Lage des Massenmittelpunktes des Stahlschiffkörpers von General — Cargo — Schiffen, «Schiffstechnik», 1961, № 10.
73. Raben M., The Vertical Centre of Gravity of Ships Steel Hulls, The Shipbuilder and Marine Engine-builder, April 1946, p. 292.
74. Robinson H. P., Rouse J. P., Thaler A. S., Modern Tankers, Transactions, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1948.
75. Schöckeluth H., Die wirtschaftliche Länge von See — Frachtschiffen und ihre Einflussfaktoren, Schiffstechnik, Bd. 4, Heft 28, 1957.
76. Schiffbau Kalender, Hilfsbuch der Schiffbau Industrie, 1921, 1922/23, 1925, 1928, 1929, 1931, 1935, 1940.
77. Vargatz W. und Giesch G., Der Anteil des Maschinenraumes in Prozenten von der Länge zwischen den Loten, «Schiffstechnik», № 11, 1957.

ОГЛАВЛЕНИЕ

От автора	3
Основные обозначения	8
Глава первая.	
Предмет теории проектирования судов, ее задачи и научный метод	9
§ 1. Предмет теории проектирования судов	—
§ 2. Методика определения элементов проектируемого судна	12
§ 3. Другие задачи теории проектирования судна. Ее место среди судостроительных дисциплин	16
§ 4. Статистическое закономерности и использование прототипов. Графическая проработка задачи	19
Глава вторая.	
Пересчеты показаний судна по прототипу при плавном и усвоенном навалом сопоставляемых судов	22
§ 1. Предварительные замечания	—
§ 2. Пересчеты по прототипу при полном подобии сопоставляемых судов	23
§ 3. Общее понятие о пересчетах при условном подобии сопоставляемых судов	30
§ 4. Формулы пересчета призматических элементов	31
§ 5. Пересчеты устойчивости на больших углах крена	32
§ 6. Пересчеты показателей непотопляемости	37
§ 7. Пересчеты общей прочности судна. Частота свободных колебаний корпуса	41
Глава третья.	
Нагрузки судна и измерения веса	43
§ 1. Общее сведения о нагрузке судна	44
§ 2. Характерные случаи нагрузок	44
§ 3. Общее понятие об измерениях веса. Разбивка нагрузки на начальных стадиях проектирования судна	48
§ 4. Соотношения веса	50
§ 5. Классификация функциональных зависимостей, выражающих вес корпуса. Формулы первой группы для определения этого веса	52
§ 6. Формулы, таблицы и графики, относящиеся ко второй группе	54
§ 7. Формулы третьей группы для определения веса стали в остове корпуса	54
§ 8. Формулы четвертой группы для определения веса корпуса	59
§ 9. Действительные замещения об определении веса корпуса	59
§ 10. Измерения веса бронирования	59

§ 11. Измерения веса механизмов	60
§ 12. Измерения веса толкателя, вала и масла	64
§ 13. Измерения веса снабжения, команды и провизии	93
§ 14. Запас водозащитных	96
§ 15. Данные по нагрузке транспортных судов	96

Глава четвертая.

Положение центра тяжести судна. Первоначальная дифференцировка и балластировка судна в эксплуатационных условиях	106
§ 1. Предварительная схема общего расположения и емкости	—
§ 2. Положение центра тяжести судна по высоте	102
§ 3. Положение центра тяжести судна по длине	110
§ 4. Первоначальная дифференцировка судна	111
§ 5. Минимальная осадка судна носом и кормой в балластном пробеге	115
§ 6. Расположение и емкость балластных цистерн	116
§ 7. Определение необходимой емкости балластных цистерн	119

Глава пятая.

Уравнение веса	123
§ 1. Общее понятие об уравнении веса	—
§ 2. Уравнение алгебраичности	126
§ 3. Классификация уравнений веса	127
§ 4. Уравнение веса, выраженных в функции главных размерных судна	—
§ 5. Использование уравнения веса, выраженных в функции главных размерных, для пересчета элементов судна по прототипу	131
§ 6. Численный пример использования уравнения веса, выраженных в функции главных размерных судна	132
§ 7. Численный пример алгебраического пересчета элементов судна по прототипу	135
§ 8. Уравнение веса, выраженных в функции водозащитности	137
§ 9. Уравнение коэффициента утилизации водозащитности	140
§ 10. Упрощенное уравнение коэффициента утилизации водозащитности. Способ проектирования водозащитности	142
§ 11. Численный пример использования уравнения коэффициента утилизации водозащитности	144
§ 12. Практические правила численного решения уравнения веса	146
§ 13. Общее понятие об уравнении веса в дифференциальной форме	146
§ 14. Обобщенное дифференциальное уравнение веса	150
§ 15. Дифференциальное уравнение веса. Пубула	156
§ 16. Обобщенный коэффициент приращения водозащитности. Коэффициенты приращения водозащитности по главным размерам и коэффициенту общей полноты	158
§ 17. Уравнение и коэффициент Нормана	161
§ 18. Дифференциальное уравнение веса второго порядка	164
§ 19. Численный пример использования обобщенного дифференциального уравнения веса	167
§ 20. Численный пример использования коэффициента Нормана	170

Глава шестая.

Вместимость плавучих судов	172
§ 1. Общее сведения о коммерческих грузах и грузовой вместимости	—
§ 2. Объем форта, хвостика и коридора гребного вала	178

4.3. Вместимость двойного дна	179
4.4. Дания машинного отделения	181
4.5. Вместимость грузовых судов с центральными машинным отделением	183
4.6. Обоснование формул, приведенных в § 5 для вычисления	188
4.7. Вместимость нефтяного и сухогрузного судов с кормовым раздвижным машинным отделением	190
4.8. Вместимость сухогрузных судов с промежуточным расположением машинного отделения	198
4.9. Уравнение устойчивости	199
4.10. Пассажироемкость	203

Глава седьмая

Приближенные формулы элементов плавучести и начальной остойчивости. Уравнение остойчивости.

§ 1. Приближенные строение по материалам	207
§ 2. Параболическая строение по материалам	207
§ 3. Составление формул, предназначенных для определения ordinаты центра тяжести	210
§ 4. Параболическое строение по плавучестью и материалам	213
§ 5. Поперечный метациентрический радиус	216
§ 6. Продольный метациентрический радиус	219
§ 7. Уравнение остойчивости в алгебраической форме	221
§ 8. Различные способы нахождения уравнения остойчивости	223
§ 9. Уравнение метacentra в дифференциальной форме	228
§ 10. Влияние элементов элементов судна на возмущение метacentra над осью	230
§ 11. Уравнение остойчивости в дифференциальной форме	233

Глава восьмая

Остойчивость судна при разных условиях нагрузки и при больших углах крена.

§ 1. Взаимное расположение кривых метacentров и центров тяжести	238
§ 2. Приближенные способы построения кривой метacentров	239
§ 3. Некоторые свойства кривой метacentров	242
§ 4. Влияние элементов элементов судна на кривые метacentров и центров тяжести	244
§ 5. Взаимное расположение кривых метacentров и центров тяжести	247
§ 6. Примеры приложения полученных результатов	249
§ 7. Приближенные формулы для статической остойчивости	251
§ 8. Влияние элементов элементов судна на его остойчивость при больших углах крена	254

Глава девятая

Определение элементов проектируемого судна

§ 1. Основные уравнения теории проектирования судна. Главные и обобщенные неизвестные	260
§ 2. Технические, экономические и технико-эксплуатационные показатели судна	263
§ 3. Способ последовательных приближений	271
§ 4. Предварительные замечания о методе вариаций и его использовании для определения наиболее выгодных скорости и грузоподъемности	278
§ 5. Применение метода вариаций для определения элементов проектируемого судна	282

§ 6. Вариационные соотношения. Построение искомых	285
§ 7. Применение метода вариаций в случае неизвестной грузоподъемности судна. Способ постоянного возмущения и его использование в рамках первого приближения	291
§ 8. Примеры использования уравнения остойчивости в методе вариаций	297
§ 9. Способ постоянного главных размерностей	303
§ 10. Практические указания к применению метода вариаций	306
§ 11. Экономический выгода для грузового судна по Шендугу	308

Глава десятая

Дополнительные сведения об определении элементов проектируемого судна. Примеры использования метода вариаций

§ 1. Математическая интерпретация метода постоянных главных размерностей судна	311
§ 2. Особенности определения элементов лосколов	317
§ 3. Обоснование выбора коэффициента общей полноты нефтяного надельмислания 15 000—18 000 м	323
§ 4. Определение элементов сухогрузного судна длиной 4500—5400 м и водоизмещением 32 000—60 000 м	327
§ 5. Определение элементов сухогрузного судна грузоподъемностью 10 000—12 000 м	330
§ 6. Определение элементов сухогрузного судна грузоподъемностью 6000 м	334
§ 7. Пример определения элементов лосколов	345
§ 8. Составление результатов, полученных с помощью метода вариаций	351

Литература

	353
--	-----

ДЛЯ ЖАРКОМУ ПОСАД
ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОРСКИХ СУДОВ.
ЧАСТЬ I
„ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОЕКТИРУЕМОГО СУДА“

Тематический план 1964 г. № 7.
Рецензенты: кафедра судостроения Горьковского
политехнического института и. т. в. Г. В. Павлов
Научный редактор А. В. Бродякин
Редактор В. М. Шилова
Оформление худ. Е. М. Васильева
Технический редактор Р. К. Чистякова
Корректор М. П. Баранова

Сдано в набор 20/3 1962 г. М-1112. Подписано в печать
20/3 1962 г. Формат бумаги 60х90¹⁴. Печать, листов 10,5.
Ра-б-от. Л. 25,0. Шпа. № 196-02. Тираж 3000 экз.
Цена 80 коп. Заказ 1794.
Ленинград, Д-46, ул. Гоголя, 6. Издательство «Судостроение».

Литература: 1. План 1. Гидротехническая
Государственного комитета Совета Министров СССР по науке,
Совместительский, И.

Замечания обесчистки

Стр.	Справка	Назначение	Содержит чтение
140	6-я эк.	$\frac{Q}{C}$	$\frac{Q^2}{C}$
140	Ф-ла (02)	$\rho \frac{1}{3}$	$\rho^{\frac{1}{3}}$
290	17-я эк.	$\left(\frac{B}{T}\right)^{-2}$	$\left(\frac{B}{T}\right)^{-2} \left[\frac{1}{3}\right]$

Д. М. Навин