

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Кораблестроение и гидравлика»

И.В. Качанов

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СУДОВ

Пособие

для студентов специальности 1-37 03 02
«Кораблестроение и техническая эксплуатация
водного транспорта»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области металлургического оборудования и технологии*

Минск
БНТУ
2019

УДК 629.5.017:378.14(075.9)

ББК 39.42-01я7

К30

Р е ц е н з е н т ы:

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой энергосбережения, гидравлики и теплотехники Белорусского государственного технологического университета *А.С. Дмитриченко*; заведующий отделом исследований в области водного транспорта БелНИИТ «Транстехника» *А.П. Афанасьев*

Качанов, И. В.

К30 Проектирование судов : пособие для студентов специальности 1-37 03 02 «Кораблестроение и техническая эксплуатация водного транспорта» / И. В. Качанов. – Минск : БНТУ, 2019. – 266 с.
ISBN 978-985-550-890-9.

Пособие составлено в соответствии с программой дисциплины «Проектирование судов», читаемой для студентов-корабелов в Белорусском национальном техническом университете.

Предназначено для студентов специальности 1-37 03 02 «Кораблестроение и техническая эксплуатация водного транспорта», осваивающих темы лекционных и практических занятий и выполняющих расчеты по курсовому и дипломному проектированию.

УДК 629.5.017:378.14(075.9)

ББК 39.42-01я7

ISBN 978-985-550-890-9

© Качанов И. В., 2019

© Белорусский национальный
технический университет, 2019

Предисловие

Курс проектирования судов обобщает и завершает теоретическую подготовку инженера-кораблестроителя в стенах учебного заведения.

Проектирование современных судов является большой и сложной задачей, поскольку существует огромное количество оперативных, тактических, технических, экономических и других требований, которые учитываются при разработке заданий на проектирование судна, а также потому что современные суда представляют собой совокупность сложнейших механизмов и точнейших приборов, построенных на основе самых последних достижений науки и техники.

Любое инженерное сооружение, в том числе и такое сложное, как современное судно, предназначено передвигаться по воде и обладает заданными экономическими и мореходными качествами, требует для постройки детальных чертежей и выполнение многочисленных и сложных расчетов, которые в комплексе носят название проекта (эскизного, технического, рабочего).

Естественно, что не всякие чертежи и расчеты могут быть использованы для постройки судна, а только те, что в полной мере отвечают требованиям, предъявляемым к проектируемому судну.

Фактически только за последние пятьдесят-шестьдесят лет создана наука, занимающаяся принципами составления проекта судна в целом, которая и называется *проектированием судов*.

Современное проектирование судов базируется на всех научных и практических достижениях кораблестроительных дисциплин – таких, как теория корабля, строительная механика корабля, конструкции корпуса, корабельные системы и устройства, технология судостроения и т. д. Используются также достижения в области машиностроения, электротехники, вооружения, приборостроения и других отраслей науки и техники, связанных с судостроением. В этом смысле наука о проектировании судов – обобщающая научная дисциплина. В то же время она имеет свои законы, методы и приемы, которые определяют процесс проектирования судна.

Проектирование судов является обобщающей кораблестроительной наукой еще и потому, что она рассматривает судно как инженерное сооружение в целом, в комплексе.

При создании судна решаются следующие вопросы:

определяются водоизмещение, главные измерения и различные соотношения и коэффициенты;

устанавливается общее расположение механизмов, систем и устройств, грузовых, жилых и служебных помещений, командных постов и т. п.;

составляется нагрузка судна и определяется положение его центра тяжести (ЦТ), грузовместимость и вместимость, живучесть и боевая защита военного судна;

разрабатывается теоретический чертеж судна.

Проектирование судна также предполагает последнее и решающее заключение о конструкции, прочности, ходкости, мореходности судна и других принципиальных вопросах, связанных с главными элементами судна в целом.

Профессор К.П. Боклевский, автор первого в мире курса проектирования кораблей, изданного в 1904 г., назвал науку, устанавливающую общие методы и приемы для расчета и составления чертежей различного типа судов со всеми их устройствами и приспособлениями, «проектированием судов».

Выдающийся советский ученый академик В.Л. Поздунин, посвятивший свою деятельность проектированию судов, назвал научную дисциплину, в которой рассматриваются общие вопросы проектирования судов, «теорией проектирования судов».

Теория проектирования судов изучает проектирование как специфическую форму инженерной деятельности, вскрывает взаимосвязь теории проектирования с военно-морским оперативным искусством, тактикой военно-морского флота и экономикой эксплуатации, выполняя их требования, а также с другими кораблестроительными науками – теорией корабля, строительной механикой корабля и т. д., которые, в свою очередь, осуществляют требования теории проектирования. Теория проектирования судов формирует научное понимание качеств судна в целом и воспитывает стремление обеспечить высокую степень его качества.

По существу, начало теории проектирования судов положено в конце XVIII в. русским академиком Л. Эйлером, создателем уравнения остойчивости, шведским кораблестроителем Ф.Х. Чапманом и продолжено российскими (С.О. Бурачёк, М.М. Окунев) и иностранными учеными (француз Ж.О. Норман). В начале XX столетия

профессора К.П. Боклевский и И.Г. Бубнов придали стройную форму новой науке, сформулировав ее основные положения. Советские ученые академик В.Л. Поздюнин, профессора А.И. Балкашин, Б.М. Малинин, А.Э. Цукшвердт, Л.М. Ногид, В.В. Ашик, конструкторы В.А. Никитин, Ю.Ю. Бенуа и многие другие сильно изменили практику проектирования судов, применив научные методы, в основу которых положена философская диалектика.

Естественно, современная научная школа проектирования судов возникла не на голом месте. Она наследует и развивает все лучшее, чего добилась научная мысль прошлого как у нас, так и за границей.

В процессе разработки проекта судна возникающие задачи решаются неоднозначно. Поэтому проектант должен, во-первых, выбрать те методы исследования, которые наиболее пригодны для разрешения конкретной задачи; во-вторых, на основе выполненного исследования выявить, какие решения из числа возможных наиболее полно удовлетворяют требованиям задания, и получить, таким образом, оптимальный вариант.

Первая группа вопросов носит методический характер, в силу чего эту часть теории проектирования часто называют методологией проектирования.

Вторая группа вопросов связана с решением поставленной задачи по существу: например, с выбором схемы и системы конструктивной подводной защиты (КПЗ), противоатомной защиты (ПАЗ), бронирования, выбором типа энергетической установки (ЭУ), схемы размещения грузовых трюмов и т. п. Осуществление такой задачи вызывает значительные трудности и не всегда, даже на основе уже имеющегося опыта, представляется возможным в каждом конкретном случае установить, какие решения целесообразнее.

Однако обычно все же удается разобраться в сущности вопроса (если не с количественной, то с качественной стороны) и наметить пути количественного решения задач, возникающих в процессе проектирования. Эта часть вопросов также решается теорией проектирования судов.

Таким образом, теории проектирования судов как наука охватывает две группы вопросов, взаимно связанных друг с другом. Первая из них посвящена разработке отдельных вопросов проектирования судна и проектированию судна в целом, вторая – изучению методов проектирования, способов выполнения различных работ,

которые составляют, как принято говорить, методологию проектирования.

По справедливому определению академика В.Л. Поздюнина, методология является составной частью теории проектирования.

При изложении курса основное внимание будет уделено рассмотрению методологических приемов проектирования. Численно конкретные задачи, кроме тех, которые будут изложены в курсе, получают свое отражение в курсовом проектировании.

Таким образом, основные задачи преподаваемой дисциплины следующие:

- формирование у студентов необходимого объема знаний об уравнениях и методах ПС;

- освоение методов проведения технических расчетов;

- получение знаний об основных классах и типах судов при проектировании судов внутреннего, смешанного и морского плавания;

- ознакомление со средствами автоматизации проектно-конструкторских работ, техническими характеристиками и экономическими показателями лучших отечественных и зарубежных образцов морской техники, а также судов внутреннего и смешанного (река-море) плавания, передовым отечественным и зарубежным опытом исследования, проектирования, конструирования и изготовления судов и особенностях их функционирования;

- приобретение студентами практических навыков выполнения расчетов по проектированию кораблей и судов различных классов и типов, применение методов их анализа и оптимизации.

1. ЗАДАЧА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДОВ (ПС) И МЕТОДЫ ЕЕ РЕШЕНИЯ

1.1. Дисциплина «Проектирование судов». Общие сведения

Под проектированием судов понимается производство всех расчетов и составление чертежей, технической и эксплуатационной документации, разрабатываемой как перед, так и в процессе постройки судна. Непосредственной задачей разработки проекта судна является изготовление чертежей, спецификаций, ведомостей и описаний, обоснованных расчетами и исследованиями, а также рассмотрение технико-экономических данных, заложенных в основу проектирования и постройки судна.

Главной задачей ПС является определение основных элементов (D, L, B, T, H, N) проектируемого судна. Эта формулировка относится ко всем этапам определения этих элементов, начиная с первых приближений и кончая моментом, когда размеры судна и его форма окончательно зафиксированы после необходимых проверочных расчетов и исследований.

На основе многочисленных примеров, используемых для определения элементов проектируемого судна, можно установить более общие методы, связанные с постановкой и решением задачи в целом. К числу этих методов, в первую очередь, следует отнести:

метод последовательных приближений (МПП);

метод вариаций (МВ).

Метод (принцип) последовательных приближений основан на том, что процесс проектирования судна разбивается на отдельные стадии (этапы). К их числу относятся:

разработка оперативных или эксплуатационных заданий;

предэскизная проработка проекта;

проработка технического проекта и рабочих чертежей.

При этом результаты, полученные по завершении этапа (приближения) используются для корректировки элементов судна, найденных в предыдущих приближениях, и уточнения принятых ранее допущений.

Присутствие в исходных уравнениях произвольных параметров делает задачу определения элементов проектируемого судна неод-

нозначной. Вследствие этого в процессе проектирования возникает необходимость выделения из многочисленных возможных сочетаний элементов судна такого сочетания, которое будет соответствовать наиболее эффективному решению поставленной задачи. Подобное решение поставленной задачи достигается методом вариаций, который позволяет определить искомые элементы в ряде исследованных вариантов и одновременно провести анализ полученных решений.

Метод последовательных приближений и МВ не исключают, а дополняют друг друга. МВ можно применять на заключительных этапах решения задачи, где используется метод последовательных приближений. С другой стороны, применение МВ возможно лишь после предварительной проработки вопроса более простыми методами (средствами), присущими методу последовательных приближений.

1.2. Место дисциплины ПС среди судостроительных дисциплин (СД)

ПС соприкасается с другими СД, сохраняя присущий им научный подход.

1. Теория корабля (ТК), например, описывает мореходные качества корабля заданных размеров и формы. ПС решает обратную задачу комплексного характера: устанавливает размеры и формы судна, которые отвечают заданным исходным данным (мореходным качествам корабля).

2. ПС имеет точки соприкосновения со строительной механикой корабля (СМК). Основным смежным вопросом является вопрос о влиянии элементов набора судна на вес корпуса.

3. Корабельная архитектура также находит отражения в ПС, особенно при решении вопросов, связанных с выбором архитектурного типа гражданских судов.

4. Технология судостроения (ТС), которой уделяется большое внимание при разработке эскизных и технических проектов на начальной стадии проектирования, также связана с ПС. Возможности ТС необходимо учитывать при проектировании формы судовой поверхности.

5. Смежными являются вопросы ПС и дисциплины «Судовые энергетические установки» (СЭУ) при выборе типа машинной установки и основных характеристик машинного оборудования, чему уделяется

особенно большое внимание при определении элементов проектируемого судна, так как машинная установка оказывает существенное влияние на качественные показатели судна в целом.

6. 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 при разработке проекта.

1.3. Классификация известных и неизвестных элементов (величин) проектируемого судна

Элементами судна в теории проектирования называются численные размерные и безразмерные величины, выражающие в совокупности основные качества судна.

Неизвестными элементами (характеристиками) проектируемого судна являются:

- 1) водоизмещение (B);
 - а) B в полном грузу в начале рейса;
 - б) B в полном грузу в конце рейса;
 - в) B порожнем;
 - г) B в балласте;
- 2) главные размерения – L , B , T , H и коэффициенты полноты формы корпуса – α , β , δ , φ , ψ ;
- 3) мощность главных механизмов, запасы топлива, воды, масла.

При проектировании судна важно наметить логическую схему решения задачи, то есть установить:

- 1) какие элементы заданы;
- 2) какие элементы неизвестны;
- 3) какие имеются допущения;
- 4) какие аналитические зависимости целесообразно использовать при разработке проекта.

Все многообразные приемы для определения технико-эксплуатационных элементов проектируемого судна сводятся в конечном счете к составлению и решению системы уравнений, связывающей заданные и частично выбранные проектантом тактико-технические и эксплуатационные показатели: автономность, дальность плавания,

состав экипажа, вид груза, дедвейт судна (D_w), главные размерения судна и коэффициенты, определяющие его форму и конструкцию.

При разработке проекта необходимо обеспечить:

- 1) требования условий эксплуатации, то есть требования в отношении плавучести, остойчивости, непотопляемости, ходкости, качки, прочности, конструкции корпуса;
- 2) требования экономики, то есть обеспечить народнохозяйственный эффект от постройки и эксплуатации судна;
- 3) требования техники производства, то есть установить реальные возможности постройки судна;
- 4) требования экономичной постройки судна.

1.4. Основные взаимосвязи между известными и неизвестными элементами проектируемого судна

Для установления взаимосвязи между известными и неизвестными элементами используются следующие уравнения:

- 1) уравнение плавучести: $D = \rho \delta L B T$;
- 2) уравнение массы корпуса: $m_k = \rho_k L B H$;
- 3) уравнение начальной метацентрической высоты (уравнение остойчивости):

$$h = \rho + z_c - z_g = A_1 \frac{B_1^2}{T} + A_2 T - A_3 H. \quad (1.1)$$

Качественные характеристики в большинстве случаев зависят не только от элементов судна, но и друг от друга. Так, например, увеличение массы (веса) по любому из разделов нагрузки влечет за собой увеличение водоизмещения; увеличение скорости движения вызывает рост мощности СЭУ и т. д. Примером таких взаимосвязей служат уравнения:

$$\text{масс } D = \sum m_i;$$

$$\text{мощности эффективной } N_E = \frac{D^{2/3} v^3}{c};$$

$$\text{масс механизмов } m_{\text{мх}} = p_{\text{мх}} \frac{D^{2/3} v^3}{C},$$

где $m_{\text{мх}}$ и $p_{\text{мх}}$ – измеритель массы механизмов;

$$\text{уравнение массы топлива } m_{\text{тп}} = q_{\text{тп}} \frac{N_E R}{\nu},$$

где $q_{\text{тп}} \left[\frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}} \right]$ – удельный расход топлива.

Приведенные выражения показывают не только взаимосвязь между известными и неизвестными элементами и характеристиками, но и зависимость их от ряда параметров (C – адмиралтейский коэффициент), нормативов ($q_{\text{тп}}$ – удельный расход топлива двигателями), коэффициентов ($p_{\text{мх}}$ – измеритель массы механизмов и т. д.), благодаря которым сокращается число уравнений и выражений, необходимых для отыскания неизвестных величин в процессе проектирования.

Для определения указанных коэффициентов, параметров, нормативов и критериев на практике используют реальные данные близких к данному судну судов-прототипов, то есть осуществляют проектирование по прототипу. Не обязательно проектируемое судно должно быть однотипным с прототипом во всех его элементах. Так, например, при проектировании теоретического чертежа можно использовать один прототип, а при вычислении измерителей массы корпуса и составлении уравнения нагрузки – другой и т. п.

1.5. Техничко-эксплуатационные характеристики судов

К технико-эксплуатационным характеристикам судов относят:

1) главные размерения судна – характерные размеры судна: длина (L), ширина (B), осадка (T), высота борта (H). Различают главные размерения – расчетные, наибольшие, габаритные;

2) водоизмещение судна – количество воды, вытесняемое судном; измеряется в единицах веса, объема или массы. Объемное водоизмещение (V) численно равно объему подводной части корпуса, включая выступающие части (рули, кронштейны и т. д.). Массовое водоизмещение (D) численно равно массе всего судна и находящихся на нем грузов. Весовое водоизмещение (G) численно равно весу всего судна и находящихся на нем грузов;

3) *грузоподъемность* судна ($m_{\text{гр}}$) – масса перевозимых грузов, которая подразделяется на полную (дедвейт Dw) и полезную массу

полезного груза, который может принять судно при осадке по грузовую ватерлинию;

4) *дедвейт* (D_w) – полная грузоподъемность судна (масса всех грузов, которые может принять судно). В дедвейт входит масса полезного груза, судовых запасов, масса топлива, воды, смазочных материалов, масса питьевой воды, провизии, экипажа и т. д. У гражданских судов дедвейт равен разности между полным водоизмещением и водоизмещением порожнего судна: $D_w = D - D_{\text{пор}}$;

5) *грузовместимость судна* (W) – суммарный объем помещений судна, предназначенных для перевозки грузов, измеряется в м^3 ;

6) *регистрационная вместимость* – объем помещений судна, защищенных от воздействия моря. Единицей измерения регистрационной вместимости является регистрационная тонна, равная 100 фут^3 (или $2,83 \text{ м}^3$). Различают два вида регистрационной вместимости – валовую (BRT) и чистую (NRT). Валовая вместимость представляет собой объем всех помещений судна, определенных в соответствии с Правилами обмера судов. Чистая вместимость получается из валовой вычетом объемов, не приносящих дохода;

7) для оценки возможности полного применения грузоподъемности используют понятия *удельной грузовой вместимости* и *удельного погрузочного объема*. Удельной грузовой вместимостью (μ) называется отношение грузовой вместимости судна (W) к массе груза, для которого оно спроектировано:

$$\mu = \frac{W}{P_{\text{гр}}}, \frac{\text{м}^3}{\text{т}}; \quad (1.2)$$

8) *удельной погрузочной кубатурой* ($\mu_{\text{гр}}$) называется отношение объема, занимаемого определенным грузом в трюме, к массе этого груза:

$$\mu_{\text{гр}} = \frac{W_{\text{гр}}}{P_{\text{гр}}}, \frac{\text{м}^3}{\text{т}}; \quad (1.3)$$

9) *скорость судна* – характеристика судна, определяющая быстроту его передвижения. Для речных судов скорость измеряют в км/ч , а для морских – в узлах ($1 \text{ узел} = 1 \text{ морская миля/ч} = 1,852 \text{ км/ч}$).

Различают:

скорость на испытаниях, замеряемую на испытаниях на мерной миле;

спецификационную (расчетную) скорость, гарантируемую договорной спецификацией для водоизмещения судна в полном грузу;

эксплуатационную скорость, достигаемую при работе СЭУ в эксплуатационном режиме при средних эксплуатационных условиях ($v_{\text{эк}}$);

техническую скорость, определяемую отношением пройденного расстояния на время движения;

10) *автономность судна* (АС) – длительность его пребывания в море без пополнения запасов топлива, пресной воды, провизии, АС измеряют в сутках (А);

11) *дальность плавания судна* (ДПС) – наибольшее расстояние, которое может пройти судно с заданной скоростью без пополнения запасов топлива, воды, смазочных материалов. ДПС измеряется в милях или км (R).

2. АНАЛИЗ ДАННЫХ ДЛЯ РАСЧЕТА ВОДОИЗМЕЩЕНИЯ СУДНА

2.1. Анализ проектных величин. Общие сведения

В техническом задании (ТЗ) на проект судна судовладелец указывает эксплуатационные характеристики (скорость, грузоподъемность, пассажироместимость, автономность, дальность плавания, численность экипажа, вид груза и т. д.).

В ТЗ, как правило, отсутствует информация по водоизмещению (D), главным размерениям (L, B, H, T), мощности СЭУ и т. д. Поэтому на первом этапе проектирования обычно определяют:

водоизмещение (D);

главные размерения (L, B, H, T);

коэффициенты полноты (α, β, δ);

мощность энергоустановки (N);

абсциссу ЦВ (x_C) и аппликату (z_C).

Отмеченные характеристики должны удовлетворять требованиям ТЗ и нормам в отношении мореходных качеств судна.

Определение указанных характеристик производится на основе аналитических уравнений теории проектирования. Эти уравнения связывают искомые и заданные величины, что позволяет создать систему уравнений, решения которой приводят к установлению неизвестных. При этом выявление указанных неизвестных характеристик производится методом последовательных приближений.

Суть метода заключается в том, что задача проектирования решается в несколько приближений, из которых каждое последующее базируется на результатах предыдущего. При этом постепенно расширяются и углубляются знания о характеристиках проектируемого судна.

Все величины, с которыми начинает работать проектант на первой стадии проектирования, принято разделять на следующие четыре группы.

1. *Известные величины.* Они включаются в ТЗ, и к ним относятся:

грузоподъемность $m_{гр}$ (масса перевозимого груза);

грузовместимость $W_{гр}$ (объем грузовых помещений);

скорость хода V (узлы, км/ч);

дальность плавания R, r (мили, км);

мощность энергоустановки N (кВт);

автономность плавания A (сутки);

пассажировместимость Π и т. д.

В ряде случаев задается тип двигателя, количество гребных валов и т. д.

2. *Нормативы.* К группе нормативов относятся величины, регламентированные нормами и правилами классификационных обществ, международных организаций. К ним относятся характеристики остойчивости (метацентрическая высота, углы крена, дифферента и т. д.), прочности (общей, местной, допускаемых напряжений, изгибающих моментов и т. д.), нормы площадей и объемов помещений, количества членов экипажа и т. д. Эту группу также можно отнести к известным величинам.

3. *Параметры.* Под параметрами условно понимаются величины, которыми можно задаваться самостоятельно. К ним относятся характеристики архитектурно-конструктивного типа судна, отноше-

ния $\frac{L}{B}, \frac{B}{T}, \frac{L}{H}, B_{\max}$ предельная ширина судна (из условия прохождения шлюзов или докования), предельная осадка T и т. д. При выборе параметров необходимо приводить обоснования их величин.

4. *Неизвестные величины.* К неизвестным относятся водоизмещение судна (D), коэффициенты формы корпуса ($\alpha, \beta, \delta, \varphi, \psi$), мощность главных двигателей, главные размерения судна (L, B, T, H), осадка носом и кормой (T_n, T_k) для разных случаев нагрузки, а также запасы топлива, воды, смазочных материалов и т. д.

2.2. Выбор судна-прототипа (СП)

Проектирование судна носит характер эволюционного творческого процесса. При этом внешним опорным элементом является учет опыта судостроения при новом проектировании. Одна из форм этого опыта – использование данных судна-прототипа.

Под *прототипом* понимается судно из числа построенных и хорошо зарекомендовавших себя в эксплуатации, достаточно близкое по данным ТЗ к проектируемому судну. В методе последовательных приближений характеристики СП применяются за исходное первое приближение. Поэтому задача выбора параметров облегчается, так как часть из них может быть выбрана по прототипу (измерители масс, отношения главных размерений $\left(\frac{L}{B}\right)_0, \left(\frac{B}{T}\right)_0, \left(\frac{H}{T}\right)_0$, коэффициенты формы $\alpha_0, \beta_0, \delta_0, \varphi_0, \psi_0$ и т. д.). Это обеспечивает их реальность и гарантирует от крупных ошибок при разработке проекта. При выборе прототипа принимаются во внимание не только его характеристики, близкие к ТЗ, но и архитектурно-конструктивный тип, материал корпуса, системы набора, тип СЭУ и т. д.

Учитывая разносторонние требования, на практике при проектировании используют несколько прототипов (по водоизмещению и размерениям прототипа может служить одно судно, по форме корпуса – другое, по общему расположению помещений – третье, по типу СЭУ – четвертое и т. д.).

Перед началом проектирования проводится анализ выбранных прототипов, который позволяет выбрать подходящий в ряде случаев

сводный (совмещенный) вариант. Для этого сводного варианта устанавливают:

водоизмещение в полном грузу D ;

водоизмещение порожнем $D_{\text{пор}}$;

дедвейт D_w ;

грузоподъемность $m_{\text{гр}}$;

главные размерения L, B, H, T ;

коэффициенты формы α, β, δ ;

скорость хода V (узлы, км/ч);

мощность СЭУ (кВт);

количество двигателей;

измерители масс $P_{\text{ко}} = \frac{m_{\text{ко}}}{D}$; $P_{\text{сэу}} = \frac{m_{\text{сэу}}}{N}$;

адмиралтейский коэффициент $C = \frac{D^{2/3} v^3}{N}$;

автономность плавания A (сутки);

дальность плавания r (км, мили);

грузовместимость W (м^3).

2.3. Нагрузка масс судна и виды водоизмещения

2.3.1. Нагрузка масс судна

Нагрузка масс позволяет рассчитывать водоизмещение судна и координаты его центра тяжести, от величины которых зависят большинство навигационных и эксплуатационных качеств проектируемого транспортного средства. Поэтому массу судна на всех стадиях проектирования определяют с максимально возможной точностью.

Нагрузкой масс судна называется совокупность всех масс, составляющих его водоизмещение. Знать массу судна и координаты центра масс требуется уже на начальной стадии проектирования: от этого зависят такие жизненно важные качества судна, как плавучесть, остойчивость, непотопляемость, ходкость, прочность, управляемость, заливаемость и т. д. Неточно определенная масса судна однозначно приведет к искажениям в оценке перечисленных выше

эксплуатационных и навигационных качеств. Поэтому расчеты нагрузки относятся к числу наиболее ответственных проектных расчетов. Все составляющие нагрузки проектируемого судна подразделяются на составляющие в соответствии с отраслевым стандартом ОСТ 5.0206-76.

Нагрузка судов по ОСТ 5.0206-76

01 – корпус, включая металлические конструкции основного корпуса и надстроек, дельные вещи, окраску, оборудование помещений;

02 – устройства судовые;

03 – судовые системы;

04 – СЭУ (главная и вспомогательная);

05 – электроэнергетическая система, связь и оборудование;

06 – вооружение боевое;

07 – (запасные части) навигационное оборудование;

08 – ЗИП;

09 – комплектация к устройствам, системам энергетической и электроэнергетической установки;

10 – балласт (постоянный) твердый и жидкий;

11 – запас водоизмещения, остойчивости – фиктивная масса для компенсации просчетов;

12 – постоянные жидкие грузы, которые находятся в трубопроводах и механизмах;

13 – снабжение, имущество (предметы снабжения по шкиперской, аварийно-спасательной и другим частям);

14 – экипаж, провизия, вода, расходные материалы;

15 – перевозимый груз;

16 – запасы топлива, воды и масла;

17 – переменные жидкие грузы (вода в цистернах успокоителей качки, вода в фекальных цистернах);

18 – жидкий балласт, принимаемый на судно для регулирования его посадки.

Все составляющие нагрузки заносятся в определенной последовательности и порядке в специальные ведомости, называемые таблицами нагрузки (табл. 2.1).

Нагрузка масс судна

Код раздела по ОСТ	Наименование разделов нагрузки	Масса m_0 , т	Плечи, м			Моменты масс, т·м		
			x_i	y_i	z_i	M_{xi}	M_{yi}	M_{zi}
01	Корпус	200	-7,56	0	3,11	-1512	0	621,3
02	Устройства судовые	12,6	1,8	0	3,5	26,6	0	44,1
03	Системы	19,0	-21	0	2,5	-399	0	47,5
04	СЭУ	47,1	-20,1	0	2,75	-947	0	130
(...) 15	Груз перевозимый	400	7,0	0	5,3	2800	0	2120
16	Запасы топлива и масла	45	6,5	0	1,5	292	0	67,5
(...) 18	Жидкий балласт	41,4	-2,46	0	2,6	-74,99	0	183
	Водоизмещение полное $D = \sum m_i$	750				$M_x = \sum mx_i$		$M_x = \sum mz_i$

Отсчет плеч x_i , y_i , z_i (координат центров тяжести отдельных составляющих нагрузки) производится от начала координат, располагаемого в точке пересечения основной плоскости, диаметральной и плоскости МШ.

2.3.2. Виды водоизмещения

Для транспортного судна выделяют, прежде всего, водоизмещение *порожнем* и *полное*, являющиеся крайними случаями состояния нагрузки (минимальное и максимальное).

Водоизмещение порожнем $D_{\text{пор}}$ – масса полностью отстроенного судна, оснащенного согласно утвержденной спецификации механизмами, системами, устройствами и другими электроэнергетическими системами, средствами связи и управления, но без экипажа, перевозимых грузов и пассажиров, запасов топлива, смазки, воды, продовольствия, фекально-сточных вод. В водоизмещение порожнее включается еще и некоторая фиктивная масса, называемая запасом водоизмещения, учитываемая только в процессе проектирования

и постройки судна. Эта масса вводится в нагрузку на случай возможных просчетов, учета отклонения теоретически рассчитанных масс от фактических, введение либо выведение в процессе проектирования и постройки судна по тем или иным причинам незначительных дополнительных масс.

Под водоизмещением в грузу D подразумевают полную массу судна, равную сумме масс всех разделов нагрузки. В ряде случаев эту сумму выражают через сумму водоизмещения порожнего $D_{\text{пор}}$ и массу экипажа, масла, воды и продовольствия.

При проведении ряда проверочных расчетов для транспортных судов представляет интерес нагрузка не только в начале рейса, но и при подходе в порт назначения, нагрузка в конце обратного рейса с остатками запасов топлива, масла, воды, с балластом или без него, с частично принятым грузом и т. д. В связи с этим Правилами БИРР предусмотрено в случае необходимости дополнительно рассматривать следующие виды водоизмещения:

- 1) судно без груза с 10 % запасов;
- 2) судно без груза со 100 % запасов;
- 3) судно без груза с балластом и 10 % (100 %) запасов;
- 4) судно с 50 % груза.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДОИЗМЕЩЕНИЯ СУДНА В ПЕРВОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

3.1. Основные расчетные уравнения

Для определения водоизмещения судна в первом приближении можно использовать уравнения масс и мощности.

Уравнение масс записывается в виде:

$$D = \sum_{i=1}^{18} m_i, \quad (3.1)$$

где D – массовое водоизмещение судна (см. табл. 2.1), т;

$D = \sum_{i=1}^{18} m_i$ – сумма масс, составляющих нагрузку судна (приведены в табл. 2.1), т.

Учитывая составляющие нагрузки по ОСТ 5.0206-76 и данные табл. 2.1, водоизмещение порожнем, дедейт и полное водоизмещение определяют следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} D_{\text{пор}} &= \sum_{i=1}^{13} m_i \\ D_w &= \sum_{i=14}^{18} m_i \\ D &= D_{\text{пор}} + D_w = \sum_{i=1}^{18} m_i \end{aligned} \right\}. \quad (3.2)$$

Величины и расположение всех масс определяют основные качества судна как плавающего инженерного сооружения и, в первую очередь, его плавучесть, остойчивость, ходкость.

Поскольку водоизмещение судна D складывается из масс постоянных и переменных, то и само оно – величина переменная. Поэтому, говоря о водоизмещении судна, всегда следует оговаривать, к какому состоянию нагрузки оно относится.

Обычно в начальных стадиях проектирования всю нагрузку представляют в виде укрупненных ее разделов и записывают уравнение масс в виде:

$$D = m_{\text{ко}} + m_{\text{м}} + m_{11} + m_{14} + m_{15} + m_{16} + m_{17}, \quad (3.3)$$

где $m_{\text{ко}}$ – масса корпуса оборудованного;

$m_{\text{м}}$ – масса механизмов;

m_i ($i = 11, 14, 15, 16, 17$) – массы i -го раздела нагрузки.

При этом масса корпуса оборудованного:

$$m_{\text{ко}} = m_{01} + m_{02} + m_{03} + m_{05} + m_{07} + m'_{09} + m'_{10} + m'_{12} + m'_{13}, \quad (3.4)$$

а масса механизмов

$$m_{\text{м}} = m_{04} + m''_{09} + m''_{12} + m''_{13}. \quad (3.5)$$

В зависимостях для $m_{\text{ко}}$ и $m_{\text{м}}$ индексом «'» обозначаем величины, относящиеся к корпусу, а индексом «''» к механизмам.

На основании опыта, накопленного в теории проектирования, масса корпуса $m_{\text{ко}}$ в уравнении (3.3) принимается пропорциональной водоизмещению D или полному объему корпуса. В расчетных зависимостях эта предпосылка представляется через пропорциональность массы корпуса $m_{\text{ко}}$ объему параллелепипеда, построенного на главных размерениях судна L, B, H . Произведение главных размеров в расчетной практике называется кубическим модулем ($L \cdot B \cdot H$ – кубический модуль).

Масса механизмов $m_{\text{м}}$ в (3.5) принимается пропорциональной мощности главных двигателей N .

$$m_{\text{м}} = f(N^k). \quad (3.6)$$

Показатель k в (3.6) в большинстве случаев принимается равным единице и только для энергоустановок со сравнительно легкими главными двигателями (по относительной массе на единицу их мощности), к которым относят паровые и газовые турбины, его принимают равным $2/3$.

3.2. Методика расчета водоизмещения судна D при заданных дедейте либо грузоподъемности

Решение уравнения (3.3) производят путем выражения определяемых масс через измерители масс. Измерителем массы называется коэффициент пропорциональности между нагрузками массы и элементами (характеристикам) судна. С учетом сказанного:

$$m_{\text{ко}} = p_{\text{ко}} D \quad \text{или} \quad m_{\text{ко}} = q_{\text{ко}} LBH, \quad (3.7)$$

где $p_{\text{ко}}$ и $q_{\text{ко}}$ – измерители массы, отнесенные к водоизмещению и кубическому модулю соответственно.

Поскольку массу $m_{\text{ко}}$ в (3.3) необходимо выразить через водоизмещение, то для этого измеритель $p_{\text{ко}}$ рассчитывают по прототипу

$$p_{\text{ко}} = \left(\frac{m_{\text{ко}}}{D} \right)_0.$$

Представление измерителя $q_{\text{ко}}$ по зависимости

$$q_{\text{ко}} = \left(\frac{m_{\text{ко}}}{LBH} \right)_0.$$

дает более надежные расчеты. Поэтому иногда определяют $q_{\text{ко}}$ по прототипу, а в уравнение (3.3) подставляют $p_{\text{ко}}$, выраженное в виде зависимости $p_{\text{ко}} = f(q_{\text{ко}})$:

$$p_{\text{ко}} = \frac{q_{\text{ко}}}{\rho \delta_0} \left(\frac{H}{T} \right)_0.$$

Аналогично массу механизмов с учетом (3.6) выражают уравнениями вида:

$$m_{\text{м}} = p_{\text{м}} N = p_{\text{м}} \frac{D^{2/3} \nu^3}{C_a}, \quad (3.8)$$

где $p_{\text{м}}$ – измеритель массы механизмов, зависящий от типа СЭУ, вспомогательных механизмов и оборудования; $p_{\text{м}}$ определяется по судну-прототипу:

$$p_{\text{м}} = \left(\frac{m_{\text{м}}}{N} \right)_0.$$

Адмиралтейский коэффициент C_a также определяется по прототипу

$$C_a = \left(\frac{D^{2/3} \nu^3}{N} \right)_0.$$

Запас водоизмещения $m_{3\text{В}} = m_{11}$ вычисляется в долях водоизмещения порожнем в зависимости от стадии проектирования. В расчетной практике для определения $m_{3\text{В}}$ используется зависимость

$$m_{3\text{В}} = p_{3\text{В}} D, \quad (3.9)$$

где $m_{3\text{В}}$ – измеритель запаса водоизмещения, принимаемый 0,01–0,025.

Учитывая изложенное, уравнение (3.3) можно представить в виде:

$$D = p_{\text{ко}}D + p_{\text{м}} \frac{D^{2/3} \nu^3}{C_a} + p_{3\text{В}}D + D_w, \quad (3.10)$$

если в исходных данных задается дедвейт судна D_w .

Если задается грузоподъемность (масса m_{15}), то уравнение (3.10) видоизменяется:

$$D = p_{\text{ко}}D + p_{\text{м}} \frac{D^{2/3} \nu^3}{C_a} + p_{3\text{В}}D + m_{14} + m_{15} + m_{16} + m_{17}.$$

При заданном дедвейте (3.10) решается сразу после приведения его к виду

$$aD - bD^{2/3} - c = 0, \quad (3.11)$$

где $a = (1 - p_{\text{ко}} - p_{3\text{В}})$; $b = p_{\text{м}} \frac{\nu^3}{C_a}$; $c = D_w$. (3.12)

При заданной грузоподъемности судна $m_{\text{гр}} = m_{15}$ прежде чем приступить к решению (3.11), необходимо определить составляющие дедвейта D_w . Делается это следующим образом.

Масса m_{16} запасов топлива, масла и питательной воды для котлов считается по формуле

$$m_{16} = q_{\text{т}} K_1 K_2 N A = q_{\text{т}} K_1 K_2 \frac{D^{2/3} \nu^3}{C_a} A, \quad (3.13)$$

где $q_{\text{т}}$ – удельный расход топлива главных двигателей; для дизельных двигателей $q_{\text{т}} = 0,17-0,20 \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$;

K_1 – коэффициент морского запаса, учитывающий непредвиденные гидрометеороусловия, возможные изменения скорости хода и курса ($K_1 = 1,15-1,2$);

K_2 – коэффициент, учитывающий увеличение расхода топлива на работу вспомогательных механизмов, запас смазки и питательной воды, а также работу на стояночных режимах ($K_2 = 1,1-1,2$);

A – автономность судна по запасам топлива, часы.

Масса m_{14} из раздела нагрузки складывается из составляющих

$$m_{14} = m_{\text{э}} + m_{\text{пр}} + m_{\text{в}} + m_0, \quad (3.14)$$

где $m_{\text{э}}$ – масса экипажа, $m_{\text{э}} = 0,12n_{\text{эк}}$;

$n_{\text{эк}}$ – число членов экипажа;

$0,12$ – средний норматив массы одного члена экипажа, т;

$m_{\text{пр}}$ – масса запасов провизии, $m_{\text{пр}} = 0,004n_{\text{эк}}A$;

$0,004$ – средний норматив запасов провизии на одни сутки, т;

A – автономность плавания в сутках;

$m_{\text{в}}$ – масса пресной питьевой и мытьевой воды $m_{\text{в}} = 0,15n_{\text{эк}}A$;

$0,15$ – минимальная норма расхода пресной воды на одного человека в сутки, т;

m_0 – масса пищевых отходов, определяемых по норме 1,2 кг на человека в сутки, $m_0 = 0,0012n_{\text{эк}}A$;

m_{17} – масса сточно-фановых, принимаемая равной массе $m_{\text{в}}$ пресной воды и подсланевых вод. Массу подсланевых вод принимают в зависимости от мощности СЭУ.

При $N \leq 2000$ кВт $m_{\text{сл}} = 12$ т;

При $N > 2000$ кВт $m_{\text{сл}} = 15$ т.

С учетом сказанного уравнение (3.11) можно привести к виду

$$aD - b'D^{2/3} - c' = 0, \quad (3.15)$$

где $a = (1 - p_{\text{ко}} - p_{3\text{в}})$; $b' = (p_{\text{м}} + q_{\text{т}}K_1K_2A)\frac{v^2}{C_a}$; $c' = m_{14} + m_5 + m_{17}$.

Если в ТЗ указана не автономность, а дальность плавания r , тогда $A = \frac{r}{v}$.

Уравнение (3.15) является алгебраическим третьего порядка с постоянными коэффициентами. Подстановкой $D = z^3$ оно приводится к виду

$$az^3 - b'z^2 - c' = 0. \quad (3.16)$$

и решается любым алгебраическим способом (способом итерации, графическим и т. д.)

В результате решения (3.16) определяется искомое водоизмещение судна D_1 , которому присваивается индекс «1», означающий первое приближение.

3.3. Определение главных размерений (ГР) и коэффициента общей полноты в первом приближении

После нахождения водоизмещения судна D_1 в первом приближении можно найти его главные размерения (ГР) – L, B, H, T .

Определение ГР можно осуществить двумя способами.

1. Путем совместного решения системы уравнений.

$$\left. \begin{array}{l} 1.1. D = \rho \delta L B T \text{ (уравнение плавучести)} \\ 1.2. h = \varphi_1 \frac{B^2}{T} + \varphi_2 T - \zeta H \text{ (уравнение остойчивости)} \end{array} \right\} \quad (3.17)$$

Если в (3.17) использовать относительную метацентрическую высоту (МЦВ) $\bar{h} = \frac{h}{B}$, то получим выражение

$$\bar{h} = \varphi_1 \frac{B}{T} + \varphi_2 \frac{T}{B} - \zeta \left(\frac{H}{T} \frac{T}{B} \right), \quad (3.18)$$

где $\varphi_1 = \frac{\alpha^2}{11,4\delta}$; $\varphi_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\delta} \right)^{0,5}$.

Значения относительной МЦВ \bar{h} имеют значения:

$\bar{h} = 0,04-0,05$ (сухогрузы);

$\bar{h} = 0,015-0,02$ (лесовозы);

$\bar{h} = 0,07-0,12$ (танкеры).

1.3. Уравнение грузовместимости

$$LBH = \frac{m_{\text{гр}}\mu_{\text{гр}}}{\delta_{\text{гр}}(1-\zeta)\lambda(1-\chi)}. \quad (3.19)$$

Уравнение (3.19) выражает кубатуру трюмов через измерения L, B, H .

Здесь $m_{\text{гр}}$ – грузоподъемность, т;

$\mu_{\text{гр}}$ – удельный погрузочный объем (объем занимаемый единицей груза), м³/т;

$\zeta = 0,08-0,1$ – коэффициент, учитывающий проходы, трапы и другие места, незанятые грузом;

$\delta_{\text{гр}}$ – коэффициент полноты трюма;

χ – коэффициент учитывающий объем набора, двойного дна и двойных бортов в районе трюма; $\chi = 0,18-0,24$ – для судов с двойным дном и двойными бортами; $\chi = 0,02-0,07$ – для судов без двойного дна и двойных бортов;

$\lambda = 0,7-0,76$ – отношение длины трюмов к длине судна.

2. Способ определения размеров по прототипу.

По этому способу необходимо задаться отношениями $\left(\frac{L}{B}\right)_0, \left(\frac{B}{T}\right)_0,$

$\left(\frac{H}{T}\right)_0$ по прототипу.

Используя уравнение плавучести $D_1 = \rho\delta_1 L_1 B_1 T_1$, учитывая, что

$$\frac{L_1}{B_1} = \frac{L_0}{B_0} = \alpha; \quad \frac{B_1}{T_1} = \frac{B_0}{T_0} = b'; \quad \frac{H_1}{T_1} = \frac{H_0}{T_0} = h; \quad T_1 = B_1 \frac{1}{b'}, \quad (3.20)$$

получим, что $D_1 = \rho\delta_1 B_1 a B_1 \frac{1}{b'}$, откуда $D_1 b' = \rho\delta_1 a B_1^3$;

$$B_1 = \left[\frac{D_1 b'}{\rho\delta_1 a} \right]^{1/3} \quad (3.20')$$

или с учетом (3.20') ширина судна в первом приближении:

$$B_1 = \left[\frac{D_1 \left(\frac{B_0}{T_0} \right)}{\rho \delta_1 \left(\frac{L_0}{B_0} \right)} \right]^{1/3}, \quad (3.21)$$

где $\left(\frac{B_0}{T_0} \right)$ и $\left(\frac{L_0}{B_0} \right)$ – соотношения главных размерений, принимаемые по данным судна-прототипа;

δ_1 – коэффициент общей полноты, принимаемый по данным судна-прототипа ($\delta_1 = \delta_0$);

ρ – плотность воды ($\rho = 1 \text{ т/м}^3$ для речной воды и $\rho = 1,025 \text{ т/м}^3$ для морской воды).

Подставляя полученное значение B_1 (3.20'), получим

$$L_1 = B_1 \left(\frac{L_0}{B_0} \right); \quad T_1 = B_1 \left(\frac{T_0}{B_0} \right); \quad H_1 = B_1 \left(\frac{H_0}{B_0} \right).$$

После нахождения главных размерений необходимо уточнить коэффициент общей полноты δ . Из ТК известно, что $\delta = f(\text{Fr})$, поэтому, определив число Фруда по длине L_1 ,

$$\text{Fr} = \frac{v}{\sqrt{gL_1}}, \quad (3.22)$$

можно определить δ по таким зависимостям:

для сухогрузов при $\text{Fr} = 0,14-0,26$

$$\delta = 1,09 - 1,68\text{Fr} \pm 0,12, \quad (3.23)$$

для танкеров и судов, перевозящих массовый грузы,

$$\delta = 1,05 - 1,4\text{Fr} \pm 0,06. \quad (3.24)$$

Таким образом, для определения коэффициента δ необходимо подсчитать число Фруда по заданной скорости и рассчитанной длине и затем по (3.23) либо (3.24) вычислить диапазон изменения δ . Если принятое ранее по прототипу δ попадает в этот диапазон, то следует принять для дальнейших расчетов это значение δ_1 .

Если δ не попадает в диапазон значений по (3.23) или (3.24), то тогда следует остановиться на значении δ , которое получается по результатам расчета по (3.23) или (3.24), и повторить расчет по определению главных размерений судна.

Следует иметь в виду, что отношение $\frac{L}{B}$ значительно влияет на ходкость и строительную стоимость судна; $\frac{B}{T}$ – на остойчивость и качку; $\frac{H}{T}$ – на вместимость и непотопляемость судна; $\frac{L}{H}$ – на общую прочность. Поэтому прежде чем принять у проектируемого судна отношение главных размерений такими же, как и у прототипа, необходимо произвести тщательный анализ мореходных качеств судна-прототипа.

Кроме того, желательно, чтобы соотношения главных размерений судна не выходили за пределы, рекомендованные Правилами и приведенные в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Соотношение главных размерений

	Район плавания					
	Неограниченный	I	II	II СП	III СП	III
L/H	18	19	20	21	22	23
B/H	2,5	2,5	3	3	3	4

После корректирования основных элементов переходят к расчету нагрузки масс проектируемого судна, который сводят в табличную форму (см. табл. 3.2).

Таблица 3.2

Нагрузка масс проектируемого судна в первом приближении

№ п/п	Наименование разделов	Формула	Масса, т
1	Корпус оборудованный	$m_{\text{ко}} = q_{\text{ко}} LBH$	
2	Механизмы	$m_{\text{м}} = p_{\text{м}} N_1$	
3	Запас водоизмещения	$m_{3\text{В}} = p_{3\text{В}} D_1$	
	Водоизмещение порожнем	$D_{\text{пор}} = \sum_{i=1}^3 m_i$	
4	Экипаж, провизия, вода, отходы	m_{14}	
5	Груз перевозимый	m_{15}	
6	Топливо, масло, пит. вода	$m_{16} = q_{\text{т}} K_1 K_2 N_1 A$	
7	Переменные жидкие грузы	m_{17}	
	Дедвейт	$D_w = \sum_{i=4}^7 m_i$	
	Водоизмещение в грузу	$\sum_1 = D_{\text{пор}} + D_w$	

Примечание. В расчетах на стадии первого приближения мощность СЭУ N_1 рассчитывается по адмиралтейской формуле

$$N_1 = \frac{D_1^{2/3} v^3}{C_a},$$

где адмиралтейский коэффициент C_a берется по данным судна-прототипа.

3.4. Частные случаи представления массы корпуса

В ряде случаев массу корпуса $m_{\text{ко}}$, чтобы не нарушать проектную часть длинными выкладками, предлагается рассматривать состоящей из массы стального корпуса и массы оборудования, то есть

$$m_{\text{ко}} = m_{\text{ст}} + m_{\text{об}}. \quad (3.25)$$

При этом масса стали может быть определена с использованием различных модулей:

$$m_{\text{ст}} = q_{\text{ст}} LBH, \text{ кг}; \quad (3.26)$$

$$m_{\text{ст}} = q'_{\text{ст}} LBH', \text{ кг}; \quad (3.27)$$

$$m_{\text{ст}} = q''_{\text{ст}} A_1 A_2 A_3 \delta^{1/3} \left(\frac{L}{H} \right)^{1/2} LBH', \text{ кг}, \quad (3.28)$$

где L, B, H – главные размерения судна;

δ – коэффициент общей полноты;

A_1, A_2, A_3 – численные коэффициенты, зависящие от длины судна, его конструктивного типа и числа палуб.

Приведенная высота борта H' в (3.27) – (3.28) определяется по уравнению:

$$H' = H + \frac{\sum l_{\text{н}}}{L} h_{\text{н}}, \quad (3.29)$$

где $h_{\text{н}}$ – средняя высота надстроек;

\sum_2 – суммарная длина надстроек и рубок первого яруса;

измерители массы $q_{\text{ст}}, q'_{\text{ст}}, q''_{\text{ст}}$ определяются по графикам либо по данным прототипов;

$A_1 = 1,0$ (суда с tin надводным бортом);

$A_2 = 1,0$ (однопалубное судно);

$A_2 = 1,06$ (двухпалубное судно);

$A_2 = 1,112$ (трехпалубное судно);

$A_3 = 1,0$ ($L = 70 \div 150$ м);

$A_3 = \frac{2,9}{L^{0,25}}$ ($L < 70$ м).

Массу оборудования в (3.25) рассчитывают по формуле

$$m_{\text{об}} = q_{\text{об}} (LBH)^{2/3}, \quad (3.30)$$

где $q_{об}$ – измеритель массы, определяемый по данным судна-прототипа

$$q_{об} = \frac{(m_{об})_0}{(LBH)_0^{2/3}}.$$

Средняя величина измерителя $q_{об}$ для грузопассажирских морских и судов ВВТ равняется $1,3 \div 1,8 \text{ т/м}^2$.

Масса механизмов m_m и топлива m_t выражается через мощность, необходимую для движения судна с заданной скоростью, и соответствующие измеритель массы p_m и норматив расхода топлива q_m . При этом

$$m_m + m_t = \left(p_m + K_1 K_2 q_t \frac{r}{v} \right) N, \quad (3.31)$$

где все величины, в том числе и K_1, K_2 имеют те же значения, что и ранее.

После преобразований уравнения (3.1) с учетом (3.3), (3.28) – (3.31) получим:

$$\begin{aligned} \rho \delta LBT = q_{ст}'' A_1 A_2 A_3 \delta^{1/3} \left(\frac{L}{H} \right)^{0,5} LBH' + q_{об} (LBH)^{2/3} + \\ + p_{зв} (\rho \delta LBT) + \left(p_m + K q_t \frac{r}{v} \right) \frac{(\rho \delta LBT)^{2/3} v^3}{c} + m_{гр} + m_{сн}. \end{aligned} \quad (3.32)$$

Для решения полученного уравнения необходимо иметь добавочные уравнения, которые могут быть получены на основе уравнения остойчивости:

$$h = r + z_c - z_y = \varphi_1 \frac{B^2}{T} + \varphi_2 T - \zeta H. \quad (3.33)$$

В качестве добавочных могут быть также использованы следующие соотношения:

$$\frac{L}{B} = a; \quad \frac{B}{T} = b; \quad \frac{H}{T} = h; \quad \delta_1 = \delta_0.$$

При совместном решении основного (3.32) и добавочного (3.33) уравнений определяются элементы L, B, T, H, δ и водоизмещение D ($D = \rho\delta LBT$) и далее остальные составляющие нагрузки.

3.5. Модификации уравнения плавучести в алгебраической форме

Наряду с традиционной формой уравнения плавучести в виде

$$D = \rho\delta LBT, \quad (3.34)$$

в процессе проектирования используют некоторые модификации (3.34).

Так, например, из (3.21) после преобразований можно записать

$$\frac{B_1}{D_1^{1/3}} = b_0 = \left[\frac{b'}{\rho\delta a} \right]^{1/3}, \quad (3.35)$$

где b_0 – относительная ширина (размерная величина).

Учитывая, что $a = \frac{L}{B}$; $b' = \frac{B}{T}$, получим, что

$$b_0 = \frac{B}{D^{1/3}} = \left[\frac{1}{\rho\delta} \left(\frac{L}{B} \right)^{-1} \frac{B}{T} \right]^{1/3}. \quad (3.36)$$

Проводя преобразования (3.34) относительно длины L , получим

$$\begin{cases} \frac{L}{B} = a; \quad \frac{B}{T} = b' \Rightarrow l = aB; \quad B = Tb'; \\ T = \frac{B}{b'} = \frac{L}{ab'}; \quad B = \frac{L}{a}. \end{cases} \quad (3.37)$$

С учетом (3.37) уравнение (3.34) примет вид

$$D = \rho\delta L \frac{L}{\alpha} \frac{L}{ab'} = \rho\delta \frac{L^2}{\alpha^2 b'} \Rightarrow L^3 = \frac{D\alpha^2 b'}{\rho\delta}, \quad \text{или} \quad \frac{L}{D^{1/3}} = \left[\frac{\alpha^2 b'}{\rho\delta} \right]^{1/3}. \quad (3.38)$$

Обозначая отношение $\frac{L}{D^{1/3}}$ через l_0 (относительная длина), получим

$$l_0 = \frac{L}{D^{1/3}} = \left[\frac{1}{\rho\delta} \left(\frac{L}{B} \right)^2 \left(\frac{B}{T} \right) \right]^{1/3}. \quad (3.39)$$

Проведя преобразования (3.35) относительно осадки T с учетом того, что

$$\frac{B}{T} = b'; \quad B = Tb'; \quad \frac{L}{B} = a \Rightarrow L = Ba = Tb'a,$$

получим

$$D = \rho\delta Tb'a Tb'T = \rho\delta T^3 (b')^2 a \Rightarrow \frac{T}{D^{1/3}} = \left[\frac{1}{\rho\delta (b')^2 a} \right]^{1/3}. \quad (3.40)$$

Обозначим отношение $\frac{T}{D^{1/3}}$ через t_0 (относительная осадка), тогда выражение (3.40) примет вид:

$$t_0 = \frac{T}{D^{1/3}} = \left[\frac{1}{\rho\delta} \left(\frac{B}{T} \right)^{-2} \left(\frac{L}{B} \right)^{-1} \right]^{1/3}. \quad (3.41)$$

Принимая во внимание соотношение между массовыми и объемными водоизмещениями в виде

$$D^{1/3} = \rho^{1/3} V^{1/3}, \text{ откуда } V^{1/3} = \frac{D^{1/3}}{\rho^{1/3}}, \quad (3.42)$$

получим зависимости для расчета относительных размерений (l, b, t) , имеющие вид:

$$l = \frac{L}{V^{1/3}} = \left[\frac{1}{\delta} \left(\frac{L}{B} \right)^2 \left(\frac{B}{T} \right) \right]^{1/3} = \rho^{1/3} l_0, \quad (3.43)$$

$$b = \frac{B}{V^{1/3}} = \left[\frac{1}{\delta} \left(\frac{L}{B} \right)^{-1} \left(\frac{B}{T} \right) \right]^{1/3} = \rho^{1/3} b_0, \quad (3.44)$$

$$t = \frac{T}{V^{1/3}} = \left[\frac{1}{\delta} \left(\frac{L}{B} \right)^{-1} \left(\frac{B}{T} \right)^{-2} \right]^{1/3} = \rho^{1/3} t_0. \quad (3.45)$$

В полученных уравнениях параметры l , b , t , l_0 , b_0 , t_0 – относительная длина, ширина и осадка соответственно. Из них первые три величины представляют собой безразмерные выражения, а три остальные отнесены к массовому водоизмещению.

Относительная длина l является важной характеристикой формы судна, используемой для систематизации экспериментальных данных по сопротивлению воды в практических расчетах остаточного сопротивления. Относительная ширина b и относительная осадка t используются как параметры для изучения соотношений элементов проектируемых судов.

3.6. Уравнение плавучести в дифференциальной форме

Наряду с алгебраической формой, включая ее модификации, практический интерес представляет уравнение плавучести в дифференциальной форме. Оно получается путем дифференцирования уравнения плавучести в алгебраической форме (3.34) в предположении, что величины δ , L , B , T являются независимыми переменными. Тогда, при

$$D = \rho \delta L B T$$

получим, что полный дифференциал функции D (при $\rho = \text{const}$) представляется в виде:

$$dD = \frac{\partial D}{\partial \delta} d\delta + \frac{\partial D}{\partial L} dL + \frac{\partial D}{\partial B} dB + \frac{\partial D}{\partial T} dT. \quad (3.46)$$

Принимая во внимание, что частные производные от водоизмещения D по основным элементам выражаются следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial D}{\partial \delta} &= \rho L B T = \frac{D}{\delta} \\ \frac{\partial D}{\partial L} &= \rho \delta B T = \frac{D}{L} \\ \frac{\partial D}{\partial B} &= \rho \delta L T = \frac{D}{B} \\ \frac{\partial D}{\partial T} &= \rho \delta L B = \frac{D}{T} \end{aligned} \right\}, \quad (3.47)$$

уравнение (3.46) можно представить с учетом (3.47) в виде

$$\frac{dD}{D} = \frac{d\delta}{\delta} + \frac{dL}{L} + \frac{dB}{B} + \frac{dT}{T}. \quad (3.48)$$

Уравнение (3.48) в дисциплине «Проектирование судов» называется *уравнением плавучести в дифференциальной форме*. В задачах, которые решаются с помощью уравнения (3.48), малые конечные приращения элементов $\Delta\delta$, ΔL , ΔB , ΔT рассматриваются приближенно, как дифференциалы этих величин $d\delta$, dL , dB , dT . Указанная особенность уравнения (3.48) позволяет прогнозировать изменения, например, водоизмещения D , если известны изменения размерений.

Так, например, если

$$d\delta = 0, \quad \frac{dL}{L} = \frac{dB}{B} = \frac{dT}{T} = 0,1,$$

то в соответствии с (3.48)

$$\frac{dD}{D} = 0,3 \Rightarrow dD = 0,3D.$$

Отсюда видно, что при изменении размеров на 10 % массовое водоизмещение D изменяется на 30 %. Следует отметить, что изменение главных размеров судна на 10 % считается предельным при использовании уравнения весов и плавучести в дифференциальной форме (3.48).

Весьма часто в практике ПС решают и обратную задачу: устанавливают, как будут изменяться размеры, если изначально известно изменение водоизмещения D . Проиллюстрируем сказанное решением следующего примера.

Пример.

Требуется определить изменение размеров $\Delta L, \Delta B, \Delta T$, если известно изменение грузоподъемности $dm_{гр}$.

Решение

Изменение водоизмещения dD ($dD = D_2 - D_1$) на основании рекомендаций [3] равняется

$$dD = \eta_n dm_{гр}. \quad (3.49)$$

С другой стороны, на основании (3.48) можно записать

$$dD = \frac{D}{\delta} d\delta + \frac{D}{L} dL + \frac{D}{B} dB + \frac{D}{T} dT \quad (3.50)$$

при $\delta = \text{const}$, $d\delta = 0$.

При постоянных значениях отношений $\frac{L}{B}$, $\frac{B}{T}$ отношение дифференциалов также будут постоянными, то есть при

$$\frac{L}{B} = \text{const} \text{ и } \frac{B}{T} = \text{const} \Rightarrow \frac{dL}{dB} = \frac{L}{B}; \frac{dB}{dT} = \frac{B}{T}.$$

Из сказанного следует

$$\left. \begin{aligned}
 1. \quad dL &= L \frac{dB}{B}; \\
 2. \quad dB &= B \frac{dT}{T}; \\
 3. \quad dT &= dB \frac{dT}{B}; \\
 4. \quad B &= dB \frac{L}{dL}; \\
 5. \quad dB &= B \frac{dL}{L}; \\
 6. \quad dT &= B \frac{dL}{L} \cdot \frac{T}{B} = T \frac{dL}{L}.
 \end{aligned} \right\} \quad (3.51)$$

Из (3.51) после преобразований получим

$$\frac{dD}{D} = \frac{dL}{L} + \frac{dB}{B} + \frac{dT}{T}. \quad (3.52)$$

Из (3.52) следует, что

$$\frac{dB}{B} = \frac{dL}{L} \quad \text{и} \quad \frac{dT}{T} = \frac{dL}{L}.$$

Тогда (3.52) можно представить в виде

$$\frac{dD}{D} = \frac{dL}{L} + \frac{dL}{L} + \frac{dL}{L} = 3 \frac{dL}{L}, \quad (3.53)$$

$$dD \cdot L = 3dL \cdot D \quad \text{или} \quad dL = \frac{LdD}{3D}. \quad (3.54)$$

Принимая во внимание, что $dD = \eta_H dm_{\text{гр}}$ можно записать, что

$$dL = \frac{L\eta_H dm_{\text{гр}}}{3D} \quad \text{или} \quad \frac{dL}{L} = \frac{\eta_H dm_{\text{гр}}}{3D}, \quad (3.55)$$

$$dB = B \frac{dL}{L} = B \frac{\eta_H dm_{гр}}{3D}, \quad (3.56)$$

$$dT = T \frac{dL}{L} = T \frac{\eta_H dm_{гр}}{3D} \quad (3.57)$$

или

$$\frac{dL}{L} = \frac{\eta_H dm_{гр}}{3D}, \quad \frac{dB}{B} = \frac{\eta_H dm_{гр}}{3D}, \quad \frac{dT}{T} = \frac{\eta_H dm_{гр}}{3D}.$$

Из вышеизложенного следует, что при изменении грузоподъемности на величину $dm_{гр}$, изменение размерений судна dL, dB, dT определяется уравнениями (3.55), (3.56), (3.57).

3.7. Дифференциальное уравнение масс (весов) и особенности его использования при определении неизвестных элементов проектируемого судна. Коэффициент Нормана

Если массы (веса), составляющие нагрузку судна, выражены в функции водоизмещения, то изменение водоизмещения dD можно установить с помощью коэффициента Нормана η_H по формуле

$$dD = \eta_H dm_{гр}. \quad (3.58)$$

Если уравнение масс, выраженное в функции водоизмещения D , записать в виде функционала

$$D = F(D, v, t, p_{к0}, q_M, q_{ТП}, P_{ЗВ}) + m, \quad (3.59)$$

то вывод дифференциального уравнения и выражение для расчета коэффициента Нормана можно осуществить следующим образом. Проведя дифференцирование (3.59), получим

$$dD = dF + dm. \quad (3.60)$$

Выразим полный дифференциал dF как сумму частных дифференциалов

$$dF = \frac{\partial F}{\partial D} dD + \frac{\partial F}{\partial v} dv + \frac{\partial F}{\partial t} dt + \frac{\partial F}{\partial P_{\text{ко}}} dP_{\text{ко}} + \frac{\partial F}{\partial q_{\text{м}}} dq_{\text{м}} + \frac{\partial F}{\partial q_{\text{тп}}} dq_{\text{тп}} + \frac{\partial F}{\partial p_{\text{зв}}} dp_{\text{зв}}. \quad (3.61)$$

Обозначим часть суммы частных дифференциалов в полном дифференциале dF через $[dF]$, понимая под $[dF]$ полный дифференциал функционала F по всем независимым переменным, за исключением водоизмещения D , главных размерений корабля и его коэффициента общей полноты. Иначе говоря, величина $[dF]$ представляет собой сумму приращений всех масс, вызванных произвольным изменением высоты борта и параметров v , t , $P_{\text{ко}}$, $P_{\text{МК}}$, $q_{\text{тп}}$, $P_{\text{зв}}$ и т. д. без учета дополнительного приращения масс, связанного с изменением элементов судна (например, водоизмещения D , размерений L , B , H , T и т. д.).

То есть

$$[dF] = \frac{\partial F}{\partial v} dv + \frac{\partial F}{\partial t} dt + \frac{\partial F}{\partial P_{\text{ко}}} dP_{\text{ко}} + \frac{\partial F}{\partial q_{\text{м}}} dq_{\text{м}} + \frac{\partial F}{\partial q_{\text{тп}}} dq_{\text{тп}} + \frac{\partial F}{\partial p_{\text{зв}}} dp_{\text{зв}}. \quad (3.62)$$

Тогда (3.60) можно записать в виде

$$dD = \frac{\partial F}{\partial D} dD + [dF] + dm, \quad (3.63)$$

или

$$\left(1 - \frac{\partial F}{\partial D}\right) dD = [dF] + dm. \quad (3.64)$$

Из (3.65) полный дифференциал водоизмещения

$$dD = \frac{[dF] + dm}{1 - \frac{\partial F}{\partial D}} = (dF_0 + dm)\eta_n, \quad (3.65)$$

где dm – изменение постоянных масс в нагрузке судна;

dF_0 – изменение переменных масс, вызванное изменением скорости, числа часов плавания, измерителей массы, нормативов и т. д.;

$$\eta_n = \frac{1}{1 - \frac{\partial F}{\partial D}} \text{ – коэффициент Нормана или коэффициент прираще-}$$

нения водоизмещения, в котором $\frac{\partial F}{\partial D}$ – сумма частных производных от всех разделов нагрузки, зависящих от водоизмещения.

Частные производные в уравнениях (3.62) – (3.64) могут быть найдены следующим образом.

Массы по отдельным разделам нагрузки, составляющие в сумме функцию F , в общем виде можно выразить зависимостью

$$m_i = D^k p_i^n \upsilon^m t^e. \quad (3.66)$$

Применяя общее правило дифференцирования, получим для частной производной от m_i по водоизмещению D выражение

$$\frac{\partial m_i}{\partial D} = k D^{k-1} p_i^n \upsilon^m t^e = k \frac{m_i}{D}. \quad (3.67)$$

Аналогичным образом частные производные массы m_i по другим переменным параметрам будут иметь вид

$$\frac{\partial m_i}{\partial p_i} = n p_i^{n-1} D^k \upsilon^m t^e = n \frac{m_i}{p_i}, \quad (3.68)$$

$$\frac{\partial m_i}{\partial \upsilon} = m p_i^n D^k \upsilon^{m-1} t^e = m \frac{m_i}{\upsilon}, \quad (3.69)$$

$$\frac{\partial m_i}{\partial t} = e p_i^n D^k v^m t^{e-1} = e \frac{m_i}{t}. \quad (3.70)$$

Таким образом, для функциональной зависимости рассмотренного типа частная производная от массы m_i по какому-то элементу, входящему в состав m_i , равна этой массе, деленной на элемент (водоизмещение D , измеритель параметра, скорость, время, автономность и т. д.), по которому производится дифференцирование, и умноженному на показатель степени при этом элементе.

Если используемое уравнение масс будет представлено в виде

$$D = m_{\text{ко}} + m_{\text{м}} + m_{\text{тп}} + m_{\text{зв}} + \sum m_i, \quad (3.71)$$

где $m_{\text{ко}}$ – масса корпуса оборудованного ($m_{\text{ко}} = p_{\text{ко}} D$);

$$m_{\text{м}} – \text{масса судовых механизмов} \left(m_i = q_i \frac{D^{2/3} v^3}{C_A} \right);$$

$$m_{\text{тп}} – \text{масса топлива и масла} \left(m_{\text{тп}} = q_{\text{тп}} \frac{D^{2/3} v^3}{C_A} \right);$$

$m_{\text{зв}}$ – масса запаса водоизмещения, ($m_{\text{зв}} = p_{\text{зв}} D$);

$\sum m_i$ – прочие переменные и постоянные массы, входящие в состав нагрузки масс судна.

В этом случае частные производные от масс, зависящих от водоизмещения D , будут иметь вид

$$\frac{\partial m_{\text{ко}}}{\partial D} = 1 \frac{m_{\text{ко}}}{D}; \quad \frac{\partial m_{\text{м}}}{\partial D} = \frac{2}{3} \frac{m_{\text{м}}}{D}; \quad \frac{\partial m_{\text{тп}}}{\partial D} = \frac{2}{3} \frac{m_{\text{тп}}}{D}; \quad \frac{\partial m_{\text{зв}}}{\partial D} = 1 \frac{m_{\text{зв}}}{D}.$$

С учетом вышеизложенного коэффициент приращения водоизмещения (коэффициент Нормана) будет выражен в следующей конкретной формуле

$$\eta_{\text{н}} = \frac{1}{1 - \frac{m_{\text{ко}}}{D} - \frac{m_{\text{зв}}}{D} - \frac{2}{3} \frac{(m_{\text{м}} + m_{\text{тп}})}{D}}. \quad (3.72)$$

Коэффициент Нормана у однотипных судов изменяется в относительно узких пределах, что обусловлено соотношениями отдельных статей нагрузки. Стабильность коэффициента η_n позволяет использовать его для ориентировочных пересчетов водоизмещения. Численные значения этого коэффициента определяются на основе состава нагрузки по однотипным судам.

Помимо определения изменения водоизмещения проектируемого судна путем пересчета с прототипа, с помощью коэффициента η_n можно производить уточнение водоизмещения в процессе последовательных приближений.

Действительно, при выводе (3.65) – (3.71) происхождение заданного изменения масс dm никак не оговаривалось. Поэтому в качестве заданного изменения масс можно рассматривать разность масс по тем или иным разделам нагрузки в предыдущем и последующем за ним приближениях – иначе говоря, разность уточненных и не уточненных масс ($dD = D_2 - D_1$).

Так, например, после решения уравнений масс, выраженных в функции водоизмещения и составления нагрузки по разделам, можно, выбрав соотношение главных размерений, определить размерения, соответствующие найденному водоизмещению, и подсчитать по ним уточненные массы корпуса, механизмов, топлива и т. п. В общем случае сумма уточненных масс не будет равна сумме этих масс до уточнения.

Обозначив разность уточненных и не уточненных масс через $dm_{гр}$, можно получить изменение водоизмещения, вызванное уточнением нагрузки

$$dD = \eta_n dm_{гр}. \quad (3.73)$$

При вычислении коэффициента Нормана η_n необходимо подсчитывать частные производные по водоизмещению (знаменатель коэффициента η_n), беря уточненные веса (массы) и известное (неуточненное) водоизмещения. Делать так следует потому, что коэффициент η_n построен на учете зависимостей между отдельными массами и водоизмещением. При имеющемся (неуточненном) водоизмещении более точными будут коэффициенты этих зависимостей, найденные по уточненным массам.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СУДНА ВО ВТОРОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

Полученное водоизмещение судна по нагрузке масс $\sum_1 = D_{\text{пор}} + DW$ обычно не совпадает с водоизмещением D_1 , определенным по уравнению плавучести $D_1 = \rho \delta_1 L_1 B_1 T_1$. Если это несовпадение будет меньше 0,5 %, то рекомендуется добиваться совпадения путем коррекции запаса водоизмещения или коэффициента общей полноты δ . В случае более значительного расхождения \sum_1 и D_1 необходимо перейти ко второму приближению.

Для этого можно предположить, что количество груза, которое может перевозить судно с найденными ранее элементами, будет отличаться от заданной грузоподъемности на величину:

$$dm_{\text{гр}} = D_1 - \sum_1. \quad (4.1)$$

Это приведет к изменению водоизмещения, которое во втором приближении определится так:

$$D_2 = D_1 + \eta dm_{\text{гр}}, \quad (4.2)$$

где $\eta_{\text{Н}}$ – коэффициент Нормана:

$$\eta_{\text{Н}} = \frac{1}{a^{-2/3} b' D_1^{-1/3}}. \quad (4.3)$$

Таким образом, для выполнения второго приближения необходимо по (4.3) рассчитать коэффициент Нормана и по (4.2), водоизмещение судна D_2 .

После определения водоизмещения во втором приближении можно найти основные элементы во втором приближении простым пересчетом. Если нет ограничений по главным размерениям, то определив коэффициент пересчета

$$\lambda_2 = \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{1/3},$$

получим

$$\begin{aligned} L_2 &= \lambda_2 L_1; \quad B_2 = \lambda_2 B_1; \quad T_2 = \lambda_2 T_1; \\ H_2 &= \lambda_2 H_1; \quad N_2 = \lambda_2^2 N_1; \quad \delta = \text{idem.} \end{aligned} \quad (4.4)$$

По вычисленным во втором приближении основным элементам судна следует снова составить нагрузку, записав ее в таблице, аналогичной 3.2; определить водоизмещение в полном грузу во втором приближении $D_2 = \rho \delta_2 L_2 B_2 T_2$ и сравнить его с полученной нагрузкой \sum_2 .

Обычно \sum_2 и D_2 расходятся незначительно, и это несоответствие устраняется изменением коэффициента общей полноты или запасом водоизмещения.

При расхождении более 0,5 % необходимо выполнить третье приближение, вполне аналогичное второму.

Можно по-другому подойти к определению главных размерений судна, если известно изменение грузоподъемности $dm_{гр}$, а следовательно, и водоизмещения $\Delta D = \eta_n dm_{гр}$. Для этого необходимо использовать уравнение плавучести в дифференциальной форме, которое при малых, но конечных приращениях $\Delta L, \Delta B, \Delta T$ примет вид:

$$\Delta D = \frac{D}{\delta} \Delta \delta + \frac{D}{L} \Delta L + \frac{D}{B} \Delta B + \frac{D}{T} \Delta T. \quad (4.5)$$

Например, если мы хотим оставить без изменения отношения $\frac{L}{B}$ и $\frac{B}{T}$ и $\delta = \text{idem}$, то получим:

$$\frac{L}{B} = \frac{\Delta L}{\Delta B}; \quad \frac{B}{T} = \frac{\Delta B}{\Delta T}; \quad \Delta L = \frac{\Delta D}{3} \frac{L}{D}. \quad (4.6)$$

Очередным этапом в определении основных элементов судна является выбор коэффициентов полноты площади конструктивной ватерлинии α и мидель-шпангоута β , а также рекомендуемого зна-

чения абсциссы центра величины x_c и площади конструктивной ватерлинии (КВЛ) x_f .

При их выборе необходимо иметь в виду, что α в основном влияет на остойчивость и непотопляемость судна, а также на обводы корпуса судна. Этот коэффициент геометрически связан с формой шпангоутов и углами заострения КВЛ. Принимать его следует или по данным судна-прототипа, или используя эмпирические формулы типа:

$$\alpha = 0,98\delta^{1/2} \pm 0,06. \quad (4.7)$$

Коэффициент полноты площади мидель-шпангоута β также следует принимать данным судна-прототипа. У тихоходных и среднескоростных судов надо стремиться к максимально возможному значению, что вызывается стремлением к уменьшению сопротивления движению судов путем заострения оконечностей. Это относится к полным судам. Верхний предел этого коэффициента на практике близок к единице и ограничивается возможностью построения теоретического чертежа без изломов ватерлиний на границах цилиндрической вставки.

Для определения можно β использовать также эмпирическую формулу:

$$\beta = 1,014\delta^{1/2} \pm 0,004. \quad (4.8)$$

Для менее полных и относительно быстроходных судов коэффициент β должен принимать меньшие значения.

Положение ЦВ по длине судна x_c влияет на распределение объема подводной части корпуса по длине судна и, следовательно, на его сопротивление при движении. Смещение ЦВ в нос сопровождается приполнением обводов в носу и соответствующим заострением их в корме, что ведет к увеличению волнового сопротивления и уменьшению сопротивления формы. И наоборот, смещение ЦВ в корму приводит к уменьшению волнового сопротивления и увеличению сопротивления формы. Поэтому при больших числах Фруда, когда основную роль в полном сопротивлении играет волновая составляющая, целесообразно ЦВ смещать в корму и наоборот.

Поскольку число Фруда и коэффициент общей полноты судна связаны между собой, то большинство эмпирических формул пред-

ставлено зависимостью $x_c/L = f(\delta)$. Рекомендуемая зависимость имеет вид

$$x_c/L = 0,12(\delta - 0,63) \pm 0,01. \quad (4.9)$$

Кривые сопротивления $R = f(x/L)$ пологи в районе минимума, поэтому отступление от рекомендаций оптимальных значений x_c/L на 0,5÷0,8 % от L практически не влияет на сопротивление. Это замечание оказывается полезным при проектной удифферентовке судна.

Для проектирования КВЛ необходимо иметь значение x_f – абсциссы центра тяжести площади КВЛ. Для определения этой величины рекомендуется использовать данные судна-прототипа или эмпирическую формулу:

$$x_f = -\frac{L}{100} (1,75 + \alpha + 3,5\alpha^2) \sqrt{1 - \alpha}. \quad (4.10)$$

5. РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ОБЩЕГО РАСПОЛОЖЕНИЯ

В результате проработки проекта, были определены основные элементы проектируемого судна – $D, N, L, B, T, H, \delta, \alpha, \beta, x_c, x_f$, при которых удовлетворены требования технического задания в отношении грузоподъемности, скорости и т. д. При этом многие мореходные и эксплуатационные качества судна (стойчивость, грузместимость и др.) остались не исследованы и в лучшем случае соответствуют выбранному судну-прототипу. Тем более это относится к случаю, если соотношения $L/B, B/T, H/T$ приняты несколько другими по сравнению с прототипом. Для оценки этих качеств на стадии начального проектирования необходимо провести дополнительные разработки, описанные далее.

Для выполнения этой работы следует выбрать архитектурно-конструктивный тип и разработать схему общего расположения судна. Эту процедуру можно разбить на два этапа:

на первом, выполняемом до определения главных размерений, рассматривают те вопросы, которые учитываются при составлении уравнения масс. К таким вопросам относятся выбор положения МО

по длине судна, ориентировочный выбор числа палуб и переборок, наличие грузового устройства;

на втором этапе, после определения главных размерений, разрабатывают принципиальную схему общего расположения, проверяют и, если требуется, корректируют принятые решения, решают вопросы, связанные с формой оконечностей, количеством надстроек и рубок, грузовыми люками и лацпортами.

Для этого на миллиметровой бумаге формата А4 или А3 изображают по найденным главным размерениям боковой вид (или разрез по ДП) судна и план главной палубы, проставляют теоретические и практические шпангоуты.

Теоретическая шпация принимается равной $L/20$, а практическая (расстояние между набором судна) определяется по рекомендациям «Правил...» по формуле

$$a = 0,002L + 0,48. \quad (5.1)$$

Полученное значение шпации округляют до стандартного значения (500, 550, 600, 650, 700, 750 и т. д.).

Отклонение от нормальной шпации может быть допущено в пределах $\pm 25\%$. В форпике и ахтерпике шпация должна быть не более 0,6 м.

На схеме изображают высоту и протяженность двойного дна и двойных бортов (выбор этих величин сделан ранее).

Далее следует установить количество водонепроницаемых переборок и изобразить их на схеме. Для этого руководствуются рекомендациями «Правил...», по которым общее число переборок, включая переборки форпика и ахтерпика, на сухогрузных судах должно быть не менее указанного в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Количество поперечных переборок грузовых судов

Длина судна, м	МО в средней части	МО в корме
до 65	4	3
65–85	4	4
85–105	5	5
105–125	6	6
125–145	7	6
145–165	8	7

Длину целесообразно выбрать по прототипу.

Форпиковая переборка должна доходить до главной палубы и располагаться на расстоянии не менее 5 % длина L и не более 3 м плюс 5 % длины судна L .

На судах, перевозящих жидкие грузы, длина грузового танка не должна превышать 0,1 L (при отсутствии продольной переборки), 0,15 L при одной, 0,2 L при двух продольных переборках.

Вместимость отсеков двойного дна и двойных бортов должна быть достаточной для размещения необходимого количества балласта.

Иногда высоту двойного дна в носовом трюме делают большей, что связано с необходимостью удифферентовки судна в пробеге порожнем.

Расположение и размеры надстроек принимают по прототипу.

В корпусе судна следует выделить места для расположения всех составляющих нагрузки в разделе «Дедвейт».

Расчет координат ЦТ осуществляется по укрупненным разделам нагрузки с использованием разработанной схемы общего расположения.

Схема расчета показана в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Расчет нагрузки и положения ЦТ судна

Наименование разделов	Масса m_i , Т	Плечи, м		Моменты, тм	
		x_i	z_i	$m_i x_i$	$m_i z_i$
Корпус оборудованный	$m_{ко}$	x_1	z_1	$m_{ко} x_1$	$m_{ко} z_1$
Механизмы	m_M	x_2	z_2	$m_M x_2$	$m_M z_2$
Запас водоизмещения	$m_{зв}$	$x_3 = U$	$z_3 = H$	$m_{зв} x_3$	$m_{зв} z_3$
Водоизмещение порожнем	$\sum_{i=1}^3 m_i$	...	...	$\sum_{i=1}^3 m_i x_i$	$\sum_{i=1}^3 m_i z_i$
Экипаж с багажом	m_3	x_4	z_4	$m_4 x_4$	$m_4 z_4$
Провизия	$m_{пр}$	x_5	z_5	$m_5 x_5$	$m_5 z_5$
Пресная вода	m_B	x_6	z_6	$m_6 x_6$	$m_6 z_6$
Груз перевозимый	$m_{гр}$	x_7	z_7	$m_7 x_7$	$m_7 z_7$
Топливо, масло, питательная вода	m_T	x_8	z_8	$m_8 x_8$	$m_8 z_8$
Сточные воды	$m_{ст}$	x_9	z_9	$m_9 x_9$	$m_9 z_9$
Дедвейт	$\sum_{i=4}^9 m_i$	...	...	$\sum_{i=4}^9 m_i x_i$	$\sum_{i=4}^9 m_i z_i$
Водоизмещение в грузу	$\sum_{i=1}^9 m_i$	...	...	$\sum_{i=1}^9 m_i x_i$	$\sum_{i=1}^9 m_i z_i$

Водоизмещение судна порожнем $D_{\text{пор}} = \sum_{i=1}^3 m_i$.

Водоизмещение судна в грузу $D = \sum_{i=1}^9 m_i$.

Координаты ЦТ судна порожнем:

$$x_g^{\text{пор}} = \frac{\sum_{i=1}^3 m_i x_i}{\sum_{i=1}^3 m_i}; \quad z_g^{\text{пор}} = \frac{\sum_{i=1}^3 m_i z_i}{\sum_{i=1}^3 m_i}. \quad (5.2)$$

Координаты ЦТ судна в грузу:

$$x_g^{\text{пор}} = \frac{\sum_{i=1}^9 m_i x_i}{\sum_{i=1}^9 m_i}; \quad z_g^{\text{пор}} = \frac{\sum_{i=1}^9 m_i z_i}{\sum_{i=1}^9 m_i}. \quad (5.3)$$

При заполнении табл. 5.2 следует иметь в виду:

в данном проекте при использовании укрупненных масс координаты по оси y не определяются. Считается, что координаты y лежат в ДП;

данные по нагрузке принимаются из расчета нагрузки масс, выполненной ранее при определении водоизмещения судна;

координаты центра тяжести корпуса оборудованного (или судна порожнем, если это задано) определяется с использованием данных

судна прототипа $x_{\text{ко}} = \frac{(x_{\text{ко}})_0}{L_0} L$; $z_{\text{ко}} = \frac{(z_{\text{ко}})_0}{H_0} H$, где индекс «0» отно-

сится к прототипу, а L и H – длина и высота проектируемого судна;

остальные координаты составляющих дедефта (и механизмов, если они не вошли в водоизмещение порожнем) определяются с использованием схемы общего расположения проектируемого судна.

После определения центра тяжести судна можно перейти к удифферентовке в полном грузу. Чтобы судно не имело дифферента, его

центр тяжести должен находиться на одной вертикали с центром величины: $x_g = x_c$.

Оптимальные значения центра величины можно определить по приближенной формуле

$$\frac{x_c}{L} = 0,12(\delta - 0,63) \pm 0,01.$$

и принять его из рассчитанного диапазона равным центру тяжести судна $x_c = x_g$ для проектирования теоретического чертежа.

6. РАСЧЕТ ВМЕСТИМОСТИ СУДНА

6.1. Классификация грузов. Вместимость и грузовместимость судна. Удельная грузовместимость и удельный погрузочный объем перевозимого груза

Перевозимые морем грузы делятся на сухие, наливные и газообразные.

Сухие грузы делятся на тарные, штучные, навалочные и насыпные (сыпучие).

Совокупность тарных или тарных и штучных грузов различной композиции, отличающихся весом, размерами и упаковкой, называют генеральным, или смешанным, грузом.

Полная вместимость представляет собою объем помещений судна, расположенных под верхней палубой и в постоянных крытых надстройках и рубках.

Грузовая вместимость для перевозки сыпучих грузов и для перевозки тарного (кипового) груза в одном и том же помещении отличается от теоретической вместимости.

Под теоретической вместимостью сухогрузного судна понимают объем трюмов, считая от настила двойного дна и междудонного листа до внутренней поверхности наружной обшивки и палубного настила. Вместимость по сыпучему грузу есть разность между теоретической вместимостью и объемом, занимаемым набором корпуса, и пространством, занимаемым пайолом и льялами (рис. 6.1).

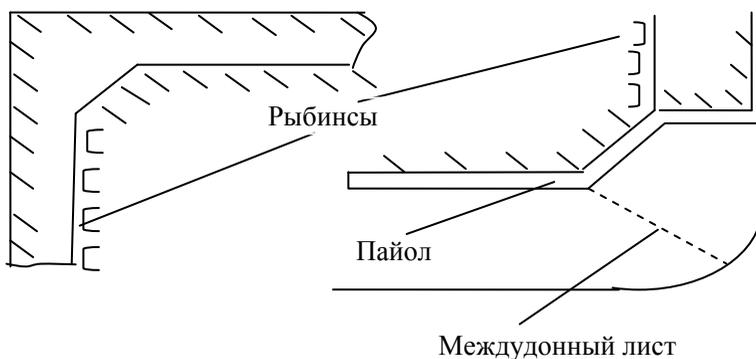


Рис. 6.1. Схема трюмного помещения для расчета вместимости по сыпучему грузу

Под объемом льял понимают объем, простирающийся от междудонного листа до деревянного настила, перекрывающего скуловые кницы.

Вместимость по тарному грузу есть кубатура трюмов, определяемая до внутренних кромок рыбинсов и нижней кромки бимсов. Как и в предыдущем случае, объем пайола и льял не входит во вместимость.

Вместимость наливных судов (танкеров) отличается от теоретической телесностью набора и запасом по кубатуре, необходимым для теплового расширения нефтепродуктов.

Вместимость по тарному грузу отличается от вместимости по сыпучему в среднем на 8–10 %, а последняя отличается от теоретической вместимости примерно на 5 %.

Подпалубная вместимость $W_{\text{пн}}$ представляет собой объем корпуса, включая объем машинного отделения, измеренный от двойного дна до верхней палубы так, как это делается для сыпучих грузов, но без учета объема грузовых люков. В подпалубную вместимость не входит также объем грузовых помещений в надстройках, если такие помещения на судне имеются.

Отношение вместимости трюмов к чистой грузоподъемности судна называется удельной вместимостью $\Delta h = \frac{\rho_{\text{ж}} i_{\text{х}}}{D}$. Различают удельную вместимость по сыпучему и тарному грузу.

Фактический объем, необходимый для перевозки весовой единицы груза, уложенного и сепарированного так, как это общепринято, называется его удельной погрузочной кубатурой.

Удельная погрузочная кубатура груза изменяется в значительных пределах от 0,2 м³/т – для свинца в чушках до 15–20 м³/т – для автомашин в сборе. Обычно суда проектируются исходя из средней удельной погрузочной кубатуры грузов на той линии, для которой суда предназначены.

Средняя удельная вместимость судов с минимальным надводным бортом для перевозки генерального груза 1,4–1,5 м³/т, а шельтердечных судов 1,8–2,2 м³/т. Эти величины имеют тенденции к росту.

На сухогрузных судах с центральным машинным отделением объем трюмов по сыпучему грузу лежит в пределах

$$W = (0,50 \div 0,60) LBH = (0,60 \div 0,75)(L - l_n) BH,$$

где l_n – длина машинного отделения.

Объем трюмов считают по зависимости

$$W = [\delta + (0,08 \div 0,10)] l BH_{тр},$$

где l – суммарная длина трюмов;

$H_{тр} = H - h_d$ – глубина трюма, измеренная у борта от настила второго дна до верхней палубы;

h_d – высота двойного дна.

Полный объем судна и объемы отдельных отсеков выражаются в процентах от водоизмещения следующими цифрами:

полный объем судна	120–140;
двойное дно	8–11;
форпик и ахтерпик	4–6;
коридор гребного вала	1,5–2;
диптанк (одна-две пары)	4–12.

6.2. Приближенные способы обеспечения грузовместимости при проектировании судна

Вместимость грузовых трюмов сухогрузных судов с центральным расположением машинного отделения может быть определена

путем вычета из подпалубной вместимости судна $W_{\text{пп}}$ объема помещений, не используемых для перевозки грузов.

Для этого предварительно определяют объем форпика, ахтерпика и коридора гребного вала $\omega_{\text{п}}$, учитывая, что отношения этого объема к полной подпалубной вместимости судна выражается зависимостью

$$\frac{\omega_{\text{п}}}{W_{\text{пп}}} = \left(C \frac{l_{\text{п}}}{l} + 3 \right),$$

где $\omega_{\text{п}}$ – объем пиков и коридора гребного вала;

$l_{\text{п}}$ – суммарная длина форпика и ахтерпика;

C – численный коэффициент.

В соответствии с этим подпалубную вместимость за вычетом объема $\omega_{\text{п}}$ можно подсчитать по формуле

$$W_1 = K_{\text{п}} W_{\text{пп}}, \quad (6.1)$$

$$\text{где } K_{\text{п}} = 1 - 0,01 \frac{\omega_{\text{п}}}{W_{\text{пп}}} = 0,97 - \frac{C}{100} \frac{l_{\text{п}}}{L}. \quad (6.1')$$

Коэффициент $\frac{C}{100}$ в формуле (6.1') зависит от коэффициента общей полноты δ и принимает значения, приведенные в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Зависимость отношения $\frac{C}{100}$ от коэффициента δ

Коэффициент общей полноты δ	0,65	0,70	0,75	0,80
$\frac{C}{100}$	0,20	0,25	0,30	0,40

В качестве средней цифры можно принять $K_{\text{п}} = 0,95$.

Для морских грузовых судов вместимость двойного дна в качестве средней величины можно принять $\omega_{\text{д}} = 0,1V$, где V – объемное водоизмещение.

Итак, подпалубная вместимость гражданского грузового судна с центральным расположением машинного отделения или полный объем всех его отсеков, расположенных между настилом второго дна и верхней палубой, можно подсчитать по формуле $W_{\text{пп}} = K_0 LBH_{\text{тр}}$, где K_0 – численный коэффициент полноты подпалубного объема.

Исключить из подпалубной вместимости объем пиков, коридоров гребных валов и других подобных помещений можно введением коэффициента $K_{\text{п}}$, подсчитанного по формуле (6.1'), тогда

$$W_1 = K_0 K_{\text{п}} LBH_{\text{тр}}. \quad (6.2)$$

Объем машинного отделения с включением объема топливных цистерн и диптанков, расположенных вне машинных и котельных отделений (но без днищевых цистерн), выражается аналогичной формулой

$$W_{\text{м}} = K_{\text{м}} l_{\text{м}} BH_{\text{тр}}, \quad (6.3)$$

где $K_{\text{м}}$ – коэффициент пропорциональности полноты объема машинного отделения;

$l_{\text{м}}$ – приведенная длина машинного отделения (суммарная длина машинных и котельных отделений, включая длину топливных цистерн и диптанков, распространяющихся от второго дна до бортов и верхней палубы).

Тогда, учитывая выражения (6.2) и (6.3), объем грузовых трюмов или полезную вместимость судна можно определить следующим образом:

$$W = (K_0 K_{\text{п}} L - K_{\text{м}} l_{\text{м}}) BH_{\text{тр}}. \quad (6.4)$$

Если глубину трюмов $H_{\text{тр}}$ выразить через высоту борта H и высоту двойного дна $h_{\text{д}}$ и поделить обе части равенства (6.4) на водоизмещение, то получим

$$\frac{W}{D} = \frac{1}{\rho \delta^{\delta}} \left(K_0 K_{\text{п}} - K_{\text{м}} \frac{l_{\text{м}}}{L} \right) \left(\frac{H}{T} - \frac{h_{\text{д}}}{T} \right). \quad (6.5)$$

Но так как коэффициент утилизации водоизмещения по чистой грузоподъемности $\eta_D = \frac{m_{гр}}{D}$ и удельная вместимость $\mu = \frac{W}{m_{гр}}$ связаны с отношением $\frac{W}{D}$ равенством $\frac{W}{D} = \mu\eta_D$, то выражение (6.5) может быть переписано в виде

$$\mu = \frac{1}{\rho\delta\eta_D} \left(K_o K_n - K_M \frac{l_M}{L} \right) \left(\frac{H - h_d}{T} \right), \quad (6.6)$$

что представляет собой уравнение вместимости, с помощью которого может быть найдена удельная вместимость, соответствующая выбранной комбинации элементов проектируемого судна.

Чтобы воспользоваться выражением (6.6), необходимо знать величины коэффициентов K_o , K_n , K_M и η_D . Что касается коэффициента K_o , то можно вычислить его по формуле Бастарда

$$K_o = (0,08 \div 0,10) + \delta.$$

Вычисление коэффициента K_n осуществляется по (6.1').

Для тех грузовых судов, у которых машинное отделение располагается, главным образом, в пределах цилиндрической вставки, $K_M = 1,0$.

Вместимость нефтевозов и сухогрузных судов с кормовым расположением машинного отделения может быть подсчитана по формулам:

для сухогрузного судна

$$W = a l B H_{тр}; \quad (6.7)$$

для нефтевоза

$$W = a' l B H, \quad (6.8)$$

где l – суммарная длина грузовых трюмов;

$a = (0,85 \div 0,90)$ и $a' = (0,95 \div 0,98)$ – коэффициенты полноты объема W , которые меньше единицы и вычисляются в зависимости от коэффициентов формы корпуса (δ , α , β), соотношений главных размерений $\left(\frac{T}{H_{\text{тр}}}, \frac{H}{T} \right)$, седловатости, погиби, бимсов, развала бортов, телесности набора, а для сухогрузных судов, с учетом объема двойного дна и объема ляд.

Вместимость сухогрузных судов с промежуточным расположением машинного отделения может быть подсчитана по формуле (6.4) либо (6.7), где коэффициенты K_m должны отличаться от тех, которые приняты для рассмотренных выше случаев.

Уравнение вместимости для сухогрузных судов с кормовым расположением машинного отделения будет иметь вид

$$\mu = \frac{a}{\rho \delta \eta_D} \frac{l}{L} \frac{H_{\text{тр}}}{T}. \quad (6.9)$$

При проектировании нефтеналивных судов обычно задается не удельная вместимость судна, а удельный вес перевозимого груза $\frac{1}{\mu}$.

Но если и при определении вместимости нефтевозов воспользоваться понятием удельной вместимости, то уравнение вместимости примет вид

$$\mu = \frac{1}{1 + \nu} \frac{a'}{\rho \delta \eta_D} \frac{l}{L} \frac{H}{T}, \quad (6.10)$$

которая отличается от предыдущего уравнения (6.9) присутствием множителя ν , учитывающего объем, необходимый на расширение нефтепродуктов. Кроме того, для нефтевозов $H_{\text{тр}} = H$ коэффициент ν в (6.10) зависит от условий плавания. Обычно принимают $\nu = 0,025 \div 0,035$.

На рис. 6.2 изображены схемы расположения помещений по длине (a) и в носовой части (δ) танкера.

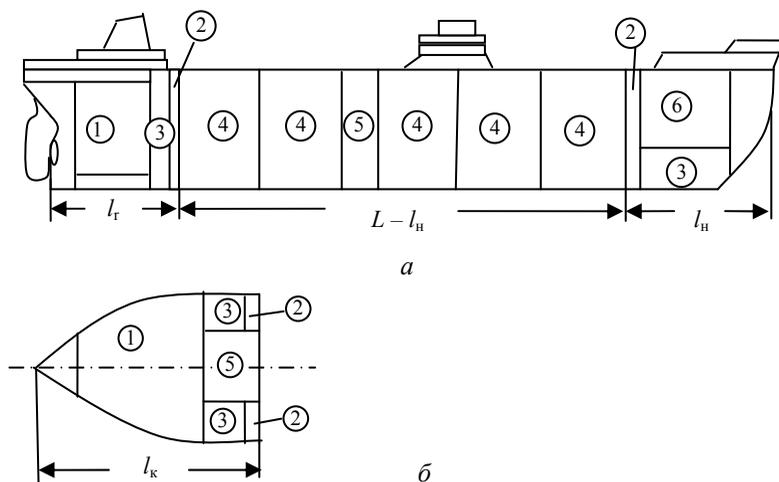


Рис. 6.2. Схема расположения помещений на нефтевозе (танкере):
 1 – машинное отделение; 2 – коффердам; 3 – топливные цистерны;
 4 – грузовые цистерны; 5 – помповое (насосное) отделение;
 б – сухогрузный трюм

6.3. Коэффициент удифферентовки λ и его влияния на положение ЦТ судна

Помповое (насосное) отделение 5 на нефтевозах располагается, как правило, между грузовыми танками (см. рис. 6.2, а) или в корме примыкающим к машинному отделению (см. рис. 6.2, б). Из рисунка следует, что длина грузовых танков может быть выражена равенством $l = L - (1 + \lambda)l_k - l_{п}$, в котором коэффициент $\lambda = \frac{l_{н}}{l_k}$ определяет условия удифферентовки. Для судов с расположением помпового отделения в корме принимаем $l_{п} = 0$, так как длина $l_{п}$ входит в l_k . Коэффициент λ представляет собой отношение длины форпика, сухогрузного трюма и коффердама к длине ахтерпика, машинного отделения, топливной цистерны и коффердама. При увеличении коэффициента λ грузовые цистерны и машинное отделение смещаются в корму, что приводит к смещению ЦТ в корму судна. При уменьшении λ ЦТ судна смещается в нос. Численное значение

коэффициента λ следует выбирать таким образом, чтобы получить желательное положение ЦТ по длине судна.

Отношение

$$\frac{l}{L} = 1 - \frac{(1 + \lambda)l_k + l_n}{L} \quad (6.11)$$

называется коэффициентом утилизации (использования) длины судна. Воспользовавшись равенством (6.11), уравнение вместимости нефтевозов (6.10) можно представить в виде

$$\mu = \frac{1}{1 + \nu} \frac{a'}{\rho \delta \eta_D} \frac{H}{T} \left[1 - \frac{(1 + \lambda)l_k + l_n}{L} \right]. \quad (6.12)$$

В уравнение вместимости входят как объемные соотношения, так и величины, характеризующие весовые соотношения и условия удифферентовки. В силу этого они могут быть использованы в самом процессе определения элементов проектируемого судна наряду с другими уравнениями.

Рассматривая в (6.12) μ как заданную величину, можно решить уравнение вместимости относительно δ , $\frac{H}{T}$ или L , что даст дополнительное условие при определении элементов проектируемого судна.

Если при проектировании нефтевоза или сухогрузного судна с кормовым расположением машинного отделения в уравнение вместимости вводится коэффициент λ , то его лучше в первом приближении определить по прототипу, а окончательную длину l_n установить после проверочного расчета удифферентовки.

6.4. Оценка факторов, влияющих на удельную вместимость

Анализируя формулы вместимости, можно отметить, что вместимость судна увеличивается с возрастанием габаритных размеров судна. Такое же влияние оказывает и коэффициент δ , поскольку с возрастанием полноты судна увеличиваются коэффициенты K_o , a , a' .

Иначе дело обстоит с удельной вместимостью, на которую изменение ширины судна не влияет, поскольку вместимость, водоизмещение и грузоподъемность изменяются пропорционально ширине судна. Такое же влияние оказывает изменение осадки судна при $\frac{H}{T} = \text{idem}$, если $\eta_D = \text{idem}$. Поэтому ширина судна не входит в уравнении удельной вместимости, а осадка фигурирует лишь в виде отношения $\frac{H}{T}$.

Отношение $\frac{H_{\text{тр}}}{T} = \frac{H}{T} - \frac{h_{\text{д}}}{T}$ непосредственно входит в уравнение удельной вместимости и в то же время влияет на коэффициент утилизации водоизмещения, фигурирующий в них. Поэтому изменение $\frac{H}{T}$ резко сказывается на удельной вместимости. Но увеличение $\frac{H}{T}$ для увеличения μ достигается за счет частичного уменьшения коэффициента водоизмещения.

За счет увеличения длины судна или уменьшения длины машинного отделения можно увеличить удельную вместимость.

Увеличение коэффициента δ , которое сопровождается возрастанием η_D , приводит к уменьшению удельной вместимости μ .

При определении пассажироместимости пользуются данными прототипов в виде таких показателей, как отношение числа перевозимых пассажиров n к водоизмещению судна D , то есть $\frac{n}{D}$, или к произведению LB длины судна на ширину $\left(\frac{n}{LB}\right)$, или к длине судна $\left(L - \frac{n}{L}\right)$.

Что касается судов дальнего плавания (каютное расположение пассажиров), то о степени комфортабельности можно судить по коэффициенту $\frac{n}{L}$, а для судов с большим числом пассажиров, не имеющих кочных мест (суда местных линий), показателем коэффициент $\frac{LB}{n}$.

Показатели комфортабельности зависят также от района плавания.

6.5. Эпюра емкости судна

В начальных стадиях проектирования разрабатываются схема общего расположения и эпюра емкости. На схеме указываются палубы, главные переборки, двойное дно, габариты надстроек, цистерны для топлива, пресной воды и балласта, кривая седловатости палубы и конструктивные особенности (рис. 6.3, а).

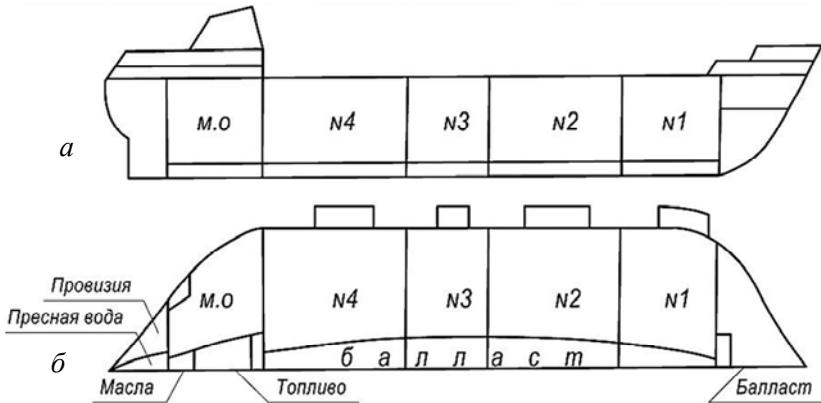


Рис. 6.3

Для построения эпюры емкости (см. рис. 6.3, б) подбирается подходящая по коэффициенту продольной полноты φ строевая по шпангоутам и соответствующая ей грузовая ватерлиния.

По основной (горизонтальной) линии эпюры емкости откладываются длина судна и длины отдельных отсеков. Затем, как вспомогательная линия, вычерчивается строевая по шпангоутам. От строевой вверх откладываются площади поперечных сечений судна, заключенные между грузовой ватерлинией и верхней палубой, которые определяются как площади прямоугольников с основанием, равным соответствующей ординате грузовой ватерлинии, и высотой, равной разности между высотой борта и осадкой в соответствующей точке по длине судна.

Кривая, соединяющая полученные точки, характеризует распределение по длине судна площадей, соответствующих полному внутреннему объему судна по верхней палубе. Аналогично вычерчиваются кривые площадей до нижележащих палуб и платформ (см. рис. 6.3, б).

Площади двойного дна в районе миделя определяются по схематическому обводу мидель-шпангоута. Найденная таким образом пло-

щадь откладывается на эюре емкости, а затем проводится вся кривая площадей двойного дна.

После этого наносят водонепроницаемые переборки и флоры, разделяющие судно и второе дно на отсеки. Затем по эюре емкости подсчитываются теоретические объемы и положение ЦТ по длине грузовых трюмов (включая грузовые люки) и цистерн для топлива, пресной воды и балласта. Положение же ЦТ этих отсеков по высоте определяется по схеме общего расположения.

Объемы отсеков и координаты их ЦТ по высоте и длине отмечают непосредственно на эюре емкости. При этом наряду с теоретическими указывают и фактические объемы, полученные с вычетом на набор и объем льял.

Если эюра емкости вычерчивается после построения теоретического чертежа, то обводы ее построения берутся с теоретического чертежа.

6.6. Понятие о регистровой вместимости

Взимание налогов и сборов с транспортных судов производится по так называемой регистровой вместимости, которая оказывается, таким образом, связанной с рентабельностью судна.

Поэтому на каждом построенном гражданском судне делается специальный обмер с целью установления его валовой и чистой регистровой вместимости. Данные такого обмера заносятся в мерительное свидетельство, которое должно быть на каждом морском судне, кроме спортивного.

Валовая и чистая регистровая вместимость измеряются в регистровых тоннах, причем 1 рег. т равняется $2,83 \text{ м}^3$, или 100 куб. футов.

Иногда употребляются термины: вместимость, брутто (или валовой регистровый тоннаж), и вместимость нетто (или чистый регистровый тоннаж).

При определении чистой регистровой вместимости *NRT* из валовой регистровой вместимости *BRT* делается наряду с другими и условный вычет на «движущие механизмы», который производится не по действительному объему машинных и котельных отделений, а в зависимости от отношения действительного объема машинных и котельных отделений, измеренного в регистровых тоннах, к валовой регистровой вместимости.

Размеры процентного вычета на движущие механизмы для винтовых судов, в зависимости от отношения объема машинных и котельных отделений W_M к валовой регистровой вместимости судна BRT приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Зависимость вычета на движущие механизмы Δ
от отношения $K = \frac{W_M}{BRT}$

$K = \frac{W_M}{BRT}, \%$	Вычет Δ
< 13	$\frac{K}{13} 0,32BRT$, где ($K \% < 13 \%$)
13–20	$0,32BRT$
≥ 20	$1,75 W_M$

Графическую зависимость вычета на движущие механизмы в функции от отношения машинно-котельных отделений к валовой регистровой вместимости можно проследить на рис. 6.4.

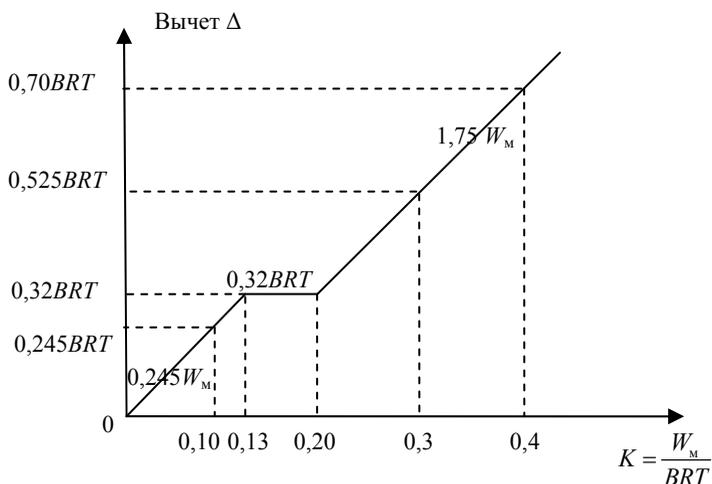


Рис. 6.4. Зависимость вычетов на движущие механизмы от отношения $\frac{W_M}{BRT}$

Для колесных судов правилами предусмотрены особые вычеты. Для примера допустим, что объем машинного отделения составляет 12 % от валовой регистровой вместимости $W_M = 0,12BRT$. В этом случае вычет на движущие механизмы будет в соответствии с данными табл. 6.2 определяться выражением

$$\Delta = \frac{12}{13} 0,32BRT = 0,295BRT.$$

Если объем машинного отделения составляет от $0,13BRT$ до $0,20BRT$, то вычет на движущие механизмы будет $\Delta = 0,32BRT$. Однако даже небольшое увеличение объема машинного отделения (например, до $W_M = 0,201BRT$) значительно повышает объем вычета на движущие механизмы. В приведенном примере вычет составит $\Delta = 1,75W_M = 0,352BRT$. Таким образом, увеличение в данном примере объема машинного отделения за счет грузовых трюмов нерационально. Поэтому лучше идти по пути увеличения кубатуры машинных и котельных шахт, мастерских, машинных кладовых и т. п. Увеличение валовой регистровой вместимости в этой связи не достигает обычно значительных размеров и не имеет существенного значения, так как сборы в большинстве случаев взимаются с чистой регистровой вместимости.

Итак, чистая регистровая вместимость судна дает лишь условное представление о его действительной вместимости: последняя (BRT) обычно превышает первую (NRT) на 15–20 %.

Расчеты показывают, что, независимо от типа главных двигателей, отношения дедвейта к валовой и чистой регистровой вместимости как для шельтердечных судов, так и для судов с минимальным надводным бортом в большинстве случаев довольно стабильны. Поэтому профессор Л.М. Ногид в качестве средних цифр для предварительных соображений рекомендует принять: $BRT \approx 0,69DW$;

$$NRT \approx 0,42DW; \quad NRT \approx 0,6BRT \left(\eta_{DW} = \frac{DW}{D} \right).$$

Взяв в качестве среднего значения коэффициента утилизации водоизмещения грузовых судов по дедвейту $\eta_{дв} = 0,67$, можно последним соотношением придать вид $BRT \approx 0,46D$; $NRT \approx 0,28D$.

Следует отметить, что подобные соотношения для пассажирских, да и для современных грузовых судов, изменяются в очень широких пределах и поэтому теряет свое показательное значение.

6.7. Обеспечение грузовместимости проектируемого судна

Уравнение грузовместимости (зависимость, выражающая кубатуру трюмов через элементы судна) имеет вид

$$LBN = \frac{m_{\text{гр}}\mu_{\text{гр}}}{\delta_{\text{тр}}(1-\xi)\lambda(1-\chi)}. \quad (6.13)$$

Входящие в (6.13) величины рассмотрены при анализе уравнения (3.19).

Обычно длина и ширина судна выбираются из других, не связанных с грузоподъемностью соображений, тогда почленно деля уравнение (6.13) на водоизмещение D , получим необходимое для обеспечения грузовместимости отношение $\frac{H}{T}$:

$$\frac{H}{T} = \frac{m_{\text{гр}}\delta\rho\eta_{\text{гр}}}{\delta_{\text{тр}}(1-\xi)\lambda(1-\chi)}; \quad \eta_{\text{гр}} = \frac{m_{\text{гр}}}{D}. \quad (6.14)$$

Для танкеров выражение (6.13) выглядит так

$$\frac{H}{T} = \frac{m_{\text{гр}}\delta\rho}{\delta_{\text{тр}}\rho_{\text{гр}}\lambda(1-\chi)}. \quad (6.15)$$

Если схема общего расположения разработана, то длина и ширина трюма $b_{\text{тр}}$ считаются известными и тогда высота трюма, необходимая для обеспечения заданной грузоподъемности, определяется для сухогрузов с двойным дном и двойными бортами:

$$h_{\text{тр}} = \frac{m_{\text{гр}}\mu_{\text{гр}}}{l_{\text{тр}}b_{\text{тр}}(1-\xi)}; \quad (6.16)$$

для танкеров с двойным дном и двойными бортами:

$$h_{\text{тр}} = \frac{k_1 \mu_{\text{гр}}}{l_{\text{тр}} b_{\text{тр}} \rho_{\text{гр}}}, \quad (6.17)$$

где $\rho_{\text{гр}}$ – плотность груза;

$k_1 = 1,01-1,02$ – коэффициент, учитывающий потери полезного объема из-за телесности набора.

Если груз на сухогрузных судах перевозится и в пространстве, ограниченном комингсами грузовых люков $W_{\text{к}}$, то

$$h_{\text{тр}} = \frac{m_{\text{гр}} \mu_{\text{гр}}}{(1 - \xi) l_{\text{тр}} b_{\text{тр}}} - \frac{W_{\text{к}}}{l_{\text{тр}} b_{\text{тр}}}. \quad (6.18)$$

Высота борта судна определяется как высота трюма плюс высота двойного дна.

Если часть груза перевозится на палубе, то объем палубного груза определяется как:

$$W_{\text{Пгр}} = l_{\text{тр}} b_{\text{тр}} h_{\text{тр}}, \quad (6.19)$$

где $l_{\text{тр}}$, $b_{\text{тр}}$, $h_{\text{тр}}$ – длина, ширина, высота укладки груза.

Очевидно, что основное влияние на величину оказывает отношение, а при осадке, обеспечивающей заданную (то есть фиксированную) грузоподъемность или грузовместимость, в основном определяется высотой надводного борта, а следовательно, и высотой борта в целом.

Поэтому полученное ранее значение высоты надводного борта необходимо откорректировать с учетом выполнения требований к грузовместимости.

При этом следует иметь в виду, что если высота надводного борта, а следовательно, и борта в целом превышает величину F_{min} , и не требуется для достижения необходимой грузовместимости, то это снижает коэффициент утилизации водоизмещения судна по грузоподъемности или дедвейту и одновременно увеличивает регистровый тоннаж. В результате ухудшается экономическая эффективность проектируемого судна. Поэтому всегда следует придерживаться минимально возможного надводного борта.

Отношение вместимости судна к его чистой грузоподъемности называют *удельной вместимостью* μ_c (величина, постоянная для данного судна). Удельная вместимость – один из важных технико-эксплуатационных показателей судна. Различают удельную вместимость по сыпучему и тарному грузам.

Действительный объем, занимаемый весовой единицей груза в упаковке и при укладке, называется удельной погрузочной кубатурой груза $\mu_{гр}$. Удельная погрузочная кубатура у различных грузов разная.

В тех случаях, когда удельная погрузочная кубатура перевозимого груза меньше удельной вместимости судна ($\mu_{гр} < \mu_c$), вместимость судна не используется полностью, то есть при загрузке по грузовую марку в трюмах останутся свободные объемы. Когда удельная погрузочная кубатура груза больше удельной вместимости ($\mu_{гр} > \mu_c$), осадка судна при полной загрузке трюмов будет меньше осадки, соответствующей полной грузоподъемности. В практике эксплуатации сравнительно редко полностью используют грузоемкость и грузоподъемность одновременно. Исключение составляют специализированные суда, предназначенные для перевозки вполне определенного груза (например, танкеры-бензовозы).

В проектные документы грузовых и грузо-пассажирских судов входит эпюра емкости (рис. 6.5).

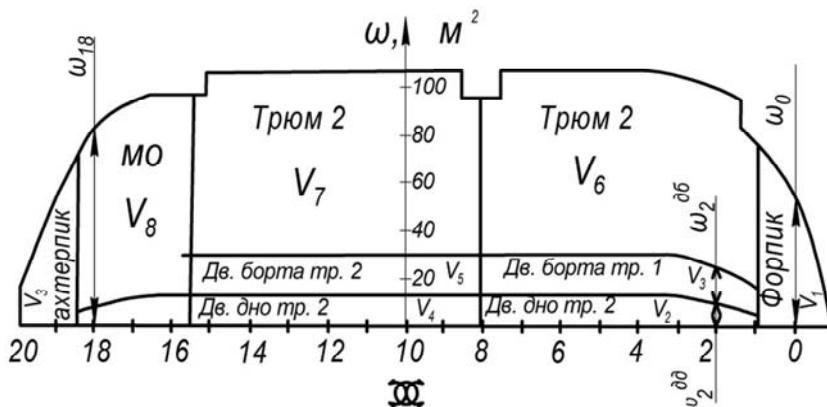


Рис. 6.5. Эпюра емкости

При построении эпюры емкости по горизонтали откладывают длину судна и длины отсеков, по вертикали – площадь поперечных сечений, двойного дна, трюмов, цистерн и других помещений. Эти площади получают с использованием теоретического чертежа (рис. 6.6). Наносят их на эпюру емкости, получают точки на теоретических шпангоутах, а затем соединяют плавными кривыми. Площадь эпюры соответствует теоретическому объему помещений.

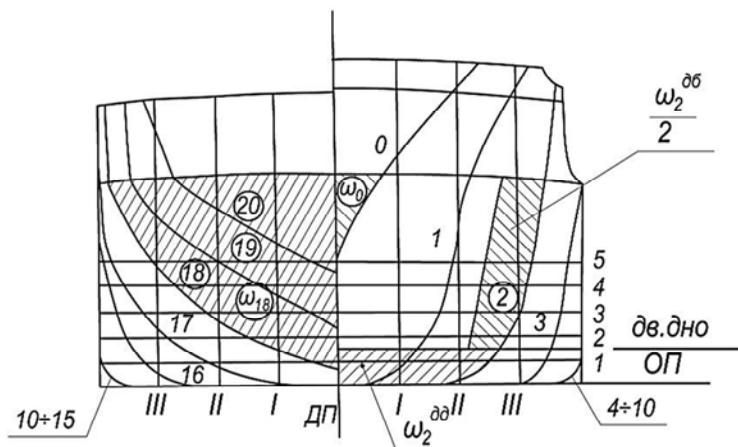


Рис. 6.6. Определению площадей поперечных сечений помещений с использованием теоретического чертежа

После нанесения на эпюру емкостей всех помещений подсчитывают их теоретические объемы и координаты центров тяжести, которые записывают в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Теоретические и расчетные объемы помещений

Помещение	Теоретический объем V_i , м ³	Коэффициент проницаемости μ	Расчетный объем $V_{i\mu}$, м ³
Форпик	V_i	0,85	
Двоенные борта i трюма	V_i	0,98	
Двойное дно i трюма	V_i	0,98	
Грузовой трюм i	V_i	0,98	
...	...		
...	...		
Машинное отделение	V_8	0,85	
Ахтерпик	V_9	0,85	

С учетом коэффициентов проницаемости в табл. 6.3 определяют расчетные объемы помещений. Эпюрой емкости удобно пользоваться в процессе проектирования судна.

Коэффициенты проницаемости должны приниматься равными: 0,85 – для помещений занятых механизмами, электростанциями, а также технологическим оборудованием; 0,95 – для жилых помещений, а также для пустых помещений, включая порожние цистерны; 0,6 – для помещений, предназначенных для сухих запасов.

Для судов, посещающих иностранные порты, определяют, кроме того, так называемую регистровую вместимость, которая измеряется в регистровых тоннах. Одна регистровая тонна равна $2,83 \text{ м}^3$.

По величине регистрового тоннажа с морского судна взимаются различного рода сборы (портовые, услуги судну, проход каналов и т. п.), то есть от величины регистровой вместимости зависят эксплуатационные расходы. При обмере судна определяют два вида вместимости: валовую; (брутто) и чистую (нетто). В валовую вместимость судна входит полный объем судна и надстроек, за исключением некоторых, особо оговоренных помещений. Для получения чистой вместимости из валовой вычитают объем помещений, не пригодных для перевозки груза и пассажиров.

7. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОСТОЙЧИВОСТИ ПРОЕКТИРУЕМОГО СУДНА

На начальных стадиях разработки проекта судна вопросы, связанные с его остойчивостью, относят к наиболее важным. Как известно, основное влияние на остойчивость оказывают отношение главных размерений B/T , H/T , а также коэффициенты формы δ , α . Выбрав в первом приближении эти параметры такими же, как у прототипа, мы освобождаемся от грубых промахов в отношении остойчивости. Однако распределение нагрузки по высоте судна может отличаться от прототипа; и сами отношения главных размерений и коэффициентов формы могут быть другими. Поэтому уже в начальных стадиях проектирования необходимо проверить обеспечение остойчивости как при малых, так и при больших наклонениях.

Остойчивость судна проверяется для различных случаев нагрузки, в частности для грузового судна:

судно в полном грузу при отходе, с равномерно распределенным во всех грузовых помещениях грузом, а также с полными запасами и топливом;

судно в полном грузу при приходе с равномерно распределенным во всех грузовых помещениях грузом и с 10 % оставшихся запасов и топлива;

судно в балласте при отходе без груза, но с полными запасами и топливом;

судно в балласте при переходе без груза и с 10 % остающихся запасов и топлива.

Если грузовое судно перевозит палубные грузы (лесовозы, контейнеровозы), необходимо учитывать груз, перевозимый на палубе.

В курсовом проекте допускается проводить расчет остойчивости для одного случая нагрузки: судно в полном грузу с полными запасами и топливом.

При наихудших в отношении остойчивости вариантах нагрузки необходимо, чтобы выполнялись следующие требования:

начальная, исправленная на влияние жидких грузов метацентрическая высота должна быть не менее значения, регламентированного Правилами;

судно должно не опрокидываясь противостоять одновременному действию динамически приложенного давления ветра и бортовой качки;

числовые значения параметров диаграммы статической остойчивости и исправленной (на влияние жидких грузов) метацентрической высоты должны быть не ниже требуемых Правилами;

остойчивость судов разных типов должна удовлетворять дополнительным требованиям.

7.1. Определение начальной метацентрической высоты. Приближенные способы оценки начальной остойчивости

В начальных стадиях проектирования, когда известны основные элементы судна, но еще нет теоретического чертежа, возможна следующая последовательность определения начальной метацентрической высоты.

Записывается уравнение остойчивости в виде принятом в теории проектирования судов

$$h = \varphi_1(\alpha, \delta) \frac{B^2}{T} + \varphi_2(\alpha, \delta) T - z_g, \quad (7.1)$$

где $\varphi_1(\alpha, \delta)$ – функция, которую приближенно можно представить

$$\text{в виде } \varphi_1(\alpha, \delta) = \frac{\alpha^2}{11,4\delta};$$

$\varphi_2(\alpha, \delta)$ – функция, определяемая по приближенному выражению $\varphi_2(\alpha, \delta) = 0,5 \left(\frac{\alpha}{\delta} \right)^{0,5}$;

z_g – аппликата центра тяжести (ЦТ) судна, определяется по формуле (5.3) по укрупненным разделам нагрузки с использованием разработанной ранее схеме общего расположения.

Во всех случаях исправленное значение метацентрической высоты на влияние свободных поверхностей жидкости должно быть не менее 0,15 м.

7.2. Анализ начальной остойчивости при проектировании судна

Задача выбора начальной остойчивости проектируемого судна имеет в каждом отдельном случае свои особенности, зависящие от назначения судна, его типа и условий эксплуатации. Тем не менее общим для всех судов является вопрос о допустимых крайних (наибольшем и наименьшем) значениях начальной остойчивости, исходя из удовлетворения требуемым условиям мореходности и безопасности плавания.

Значения наименьшей начальной метацентрической высоты h некоторых типов судов колеблются в следующих пределах (м) [11]:

большие пассажирские суда (лайнеры)	0,3–0,4;
средние пассажирские и грузопассажирские суда	0,3;
большие грузовые суда	0,1–0,2;
средние грузовые суда	0,2–0,3;
малые грузовые суда	0,3–0,4;
лесовозы	0,0–0,1;
авианосцы	2,0–3,5;
крейсеры-ракетоносцы	1,0–0,8;

эсминцы	0,7–1,2;
сторожевые корабли	0,5–0,8.

В процессе эксплуатации судна очень часто возникают крены, которые полностью устранить не представляется возможности. Поэтому приходится наибольшие значения таких углов крена судна ограничивать определенными пределами, выбираемыми на основе учета особенностей назначения судна.

Наибольшие углы крена судна будут соответствовать его наименьшей начальной остойчивости. Следовательно, решение задачи по обеспечению для данного судна указанных углов крена не выше максимально допустимой для него величины сводится в конечном счете к выбору для того же судна наименьшего предела начальной метацентрической высоты с учетом рассматриваемого условия.

7.2.1. Крен от скопления пассажиров у одного из бортов судна

Крен от скопления пассажиров у одного из бортов судна может быть как при выходе в рейс, так и при подходе к порту назначения в конце рейса. Могут быть и другие причины скопления. Такой угол крена опасности для судна не представляет, тем не менее его ограничивают 10° , чтобы не воздействовать на психику пассажиров и не вызывать у них паники. Тот же угол крена при наличии установившейся циркуляции судна ограничивается величиной 12° .

Кренящий момент от скопления пассажиров выражается формулой

$$M_{кр} = qn\epsilon B \cdot 10^{-3}, \quad (7.2)$$

где q – вес одного пассажира в н (в среднем принимают $q = 750$ н с ЦТ от палубы 1,1 м и на 1 м^2 – 6 человек),

n – число пассажиров;

ϵB – кренящее плечо в долях от ширины судна в м ($\epsilon = 0,4 \div 0,45$).

Приравняв момент $M_{кр}$ и восстанавливающий момент M_B ($M_B = Dgh\theta$), определяют угол крена θ от скопления пассажиров на

одном из бортов судна. Этот угол зависит только от $\frac{n}{D}$ – числа пас-

сажиров, отнесенных к I т водоизмещения, и от $\frac{B}{h}$ – обратного значения относительной метацентрической высоты судна.

Величина $\frac{n}{D}$ зависит от назначения пассажирского судна и равняется:

0,01–0,05 у грузопассажирских судов;

0,05–0,10 у пассажирских судов (лайнеров) с большой продолжительностью их пребывания в море;

0,3–0,5 у пассажирских судов прибрежного плавания.

У грузопассажирских судов при малом $\frac{n}{D}$ и большом значении

$\frac{B}{h}$ в конце рейса углы крена небольшие, меньше допустимых по Нормам Регистра Российской Федерации и Республики Беларусь.

У пассажирских судов при больших $\frac{n}{D}$ углы крена в конце рейса все же больше, так как остойчивость их в этот момент мала. Это особенно относится к большим пассажирским судам, у которых относительная остойчивость в конце рейса бывает $\sim 0,015$ – $0,018$.

Таким образом, у многих пассажирских судов для ограничения данного угла крена может возникнуть необходимость поднять нижний предел их начальной остойчивости за счет приема на них дополнительного количества водяного балласта, и это нужно иметь в виду при разработке проекта. У судов прибрежного плавания при большом значении $\frac{n}{D}$ ограничение угла крена от скопления пассажиров у одного борта достигается путем увеличения начальной остойчивости, которая из-за краткого времени рейса почти не меняется. Увеличение достигается путем укладки на судне постоянного балласта.

7.2.2. Крен на установившейся циркуляции

В настоящее время определяется только крен на установившейся циркуляции. Динамическое изменение угла крена в первый период перекладки руля остается неизвестным. Максимальное значение угла

крена на установившейся циркуляции может быть найдено по формуле Г.А. Фирсова, которая в соответствии с рис. 7.1 имеет вид

$$\theta^\circ = \frac{1,4}{h} \frac{v^2}{L} \left(z_g - \frac{T}{2} \right), \quad (7.3)$$

где v – скорость хода судна на прямом курсе, м/с;

L – длина судна, м;

z_g – отстояние ЦТ судна от основной плоскости, м;

T – осадка судна, м.

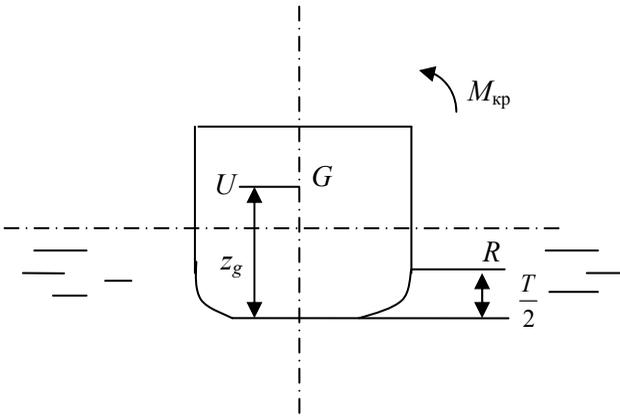


Рис. 7.1

Из выражения (7.3) следует, что угол крена пропорционален v^2 , поэтому у быстроходных судов он может быть большим, особенно у пассажирских катеров, прогулочных судов и т. п. На таких судах нужно обеспечить углы крена на циркуляции не выше допустимых, то есть не более 8° .

Угол крена при аварийном затоплении и обеспечение аварийной начальной остойчивости.

При выборе нижнего предела начальной остойчивости проектируемого судна для условий его нормального плавания необходимо, помимо учета перечисленных выше требований, позаботиться также о том, чтобы был обеспечен соответствующий запас остойчивости на

случай ее резкого падения при повреждении корпуса судна и затопления в нем части отсеков: необходимо обеспечить минимальную аварийную остойчивость как при симметричном затоплении отсеков. В первом случае дело сводится к обеспечению минимально положительной остойчивости для удержания судна в прямом положении, во втором – к назначению такой метацентрической высоты, при которой угол крена судна не был бы выше допустимого.

Нижний предел начальной остойчивости у морских торговых судов, как уже отмечалось, соответствует случаю их загрузки с полным грузом и с израсходованными судовыми запасами, в том числе и запасами топлива.

Наихудшим аварийным случаем в смысле уменьшения остойчивости судна является тот, когда водой затопляются наиболее широкие отсеки в средней части по длине судна. Если под затопленными отсеками будут находиться пустые неповрежденные отсеки, например, междудонные цистерны, диптанки и т. п., то это еще сильнее уменьшит остойчивость судна.

Исследуя изменение начальной остойчивости судна при симметричном затоплении его отсеков в наихудших условиях (отсеки расположены посередине и под ними пустые междудонные цистерны), Л.М. Ногид получил выражение для относительного изменения начальной метацентрической высоты в виде

$$\frac{\Delta h}{B} = C_1 \frac{T}{B} - C_2 \frac{B}{T}, \quad (7.4)$$

где C_1 и C_2 – некоторые функции, зависящие от элементов формы корпуса (β , α , δ и др.), общей протяженности затопленных отсеков и других особенностей судна.

Из выражения (7.4) следует, что величина $\frac{\Delta h}{B}$ зависит от $\frac{B}{T}$ при расчетном состоянии загрузки судна, причем, как показал Л.М. Ногид, по мере увеличения $\frac{B}{T}$ величина $\frac{\Delta h}{B}$ закономерно уменьшается, то есть между $\frac{B}{T}$ и $\frac{\Delta h}{B}$ существует обратная пропорциональность.

Для каждого судна в зависимости от его особенностей и требова-

ний, предъявляемых к его непотопляемости, существует такое предельное критическое отношение $\frac{B}{T}$, при котором начальная остойчивость в аварийных условиях остается практически неизменной, но это отношение недостаточно для обеспечения остойчивости судна в неповрежденном состоянии. Поэтому реальные значения $\frac{B}{T}$, как правило, получаются больше предельно целесообразных значений с точки зрения аварийной остойчивости. В силу этого задачу обеспечения необходимой аварийной начальной остойчивости проектируемого судна в большинстве случаев приходится решать повышением нижнего предела остойчивости судна в условиях его нормального плавания путем балластировки забортной водой или, на пассажирских судах, путем приема постоянного твердого балласта.

При несимметричном затоплении, особенно военных судов, решающим фактором является аварийный крен, который можно подсчитать по форме

$$\theta = \frac{\sum \nu y_{\nu}}{V h_{\min}}, \quad (7.5)$$

где ν – объем затопленного отсека, м³;

y_{ν} – координата ЦТ затопленного отсека, м;

V – объемное водоизмещение судна, м³;

h_{\min} – минимальная метацентрическая высота, м.

По выражению (7.5) допустимый угол крена определяется из условия минимально допустимой величины оставшейся высоты надводного борта в аварийных условиях. В этом случае суммарная длина затопляемых отсеков должна быть не менее $0,2L$, а максимальный статический угол крена не более 10° .

Определение максимально допустимой величины начальной поперечной метацентрической высоты производится из условия обеспечения плавной бортовой качки с возможно малыми амплитудами, что является одной из основных задач проектирования, поскольку этим достигаются не только высокие эксплуатационные качества, но и безопасность плавания судна.

Плавность качки определяется периодом. Период свободных бортовых колебаний судна выражается формулой

$$T_0 = C \frac{B}{\sqrt{h}}, \quad (7.6)$$

где C – эмпирический коэффициент, определяемый по прототипу (у пассажирских судов он равен 0,80–0,87; у грузовых в полном грузу 0,77–0,81);

B – ширина судна, м;

h – метацентрическая высота, м.

При значениях периода бортовой качки судна, близких или равных периоду волны, возникает особо неприятная резонансная качка с большими амплитудами.

Период волны τ связан с ее длиной равенством

$$\tau = \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g}}, \quad (7.7)$$

где λ – длина волны, м;

g – ускорение силы тяжести, м/с².

Связь между длинами и периодами волн можно проследить по следующим данным, приведенными в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Взаимосвязь между длиной λ и периодом τ волны

λ , м	60	80	100	120	140	160	180	200
τ , сек	6,0	7,0	8,0	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0

При плавании в море судно с большей вероятностью может встретить короткие, нежели длинные волны. Поэтому суда с малыми периодами собственных колебаний будут чаще встречать неблагоприятные для них волны и испытывать резонансную качку. В силу этого при проектировании большинства судов стремятся увеличивать

периоды их собственных бортовых колебаний. Но в соответствии с (7.6) период собственных колебаний судна обратно пропорционален корню квадратному из метацентрической высоты, следовательно, необходимо верхний предел ее ограничивать, чтобы у нового судна наименьшая величина периода собственных колебаний была бы не менее допустимой для судов данного типа, или ограничивать максимальный период, что делается для военных судов.

7.3. Обеспечение остойчивости на больших углах крена

Основными факторами при оценке остойчивости судна на больших углах крена являются ветер и волнение моря, совместное действие которых способно вызвать значительный крен у любого судна.

Обычно при проектировании любого судна стремятся к достижению более высоких показателей его остойчивости на больших углах крена в условиях нормального плавания, чтобы таким путем обеспечить большие запасы ее на случай аварии судна, что делается в первую очередь за счет увеличения запаса плавучести.

Остойчивость судна регламентируется Нормами остойчивости морских и рейдовых судов Регистра Российской Федерации, принятыми в 1959 г.

Судно считается остойчивым, если оно при наихудшем в смысле остойчивости варианте нагрузки способно, не опрокидываясь, противостоят одновременному действию динамически приложенного давления ветра и бортовой качки.

Это положение может быть выражено условием

$$M_{кр} \leq M_{опр}, \quad (7.8)$$

где $M_{кр}$ – кренящий динамически приложенный от давления ветра момент в кН·м;

$M_{опр}$ – минимальный опрокидывающий момент, равный предельной величине того действующего динамического момента, при котором наступает опрокидывание судна.

При определении кренящего момента в выражении (7.8) предполагается, что динамически действующий ветер направлен нормаль-

но к диаметральной плоскости судна и нарастает мгновенно. При этом величина кренящего момента определяется по формуле

$$M_{кр} = pS_{\Pi}Z_{\Pi}10^{-3},$$

где p – давление ветра, н/м²;

S_{Π} – площадь парусности (проекция боковой поверхности надводной части судна на диаметральную плоскость), м²;

z_{Π} – отстояние центра парусности от действующей ватерлинии, м.

По удельному давлению суда делятся на три категории:

I – суда неограниченного плавания;

II – суда ограниченного плавания, удаляющиеся от берега не более 100 миль;

III – суда прибрежного и рейдового (20 миль) плавания.

Условные расчетные давления (p н/м²) для судов всех трех категорий даны в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Расчетные давления ветра в зависимости от категории плавания

$z_n, \text{ м}$ Категория	1	2	3	4	5	6	7 и выше
I	960	1170	1310	1400	1470	1530	1560
II	510	660	740	800	840	870	880
III	270	330	370	390	410	430	440

Определение минимального опрокидывающего момента производится по диаграмме динамической или статической остойчивости в зависимости от расчетной амплитуды бортовой качки θ_m . На рис. 7.2 представлен случай, когда момент $M_{опр}$ определяется по диаграмме динамической остойчивости. Здесь $M_{опр} = D\overline{BE}$, если диаграмма построена в масштабе плеч, где D – водоизмещение в кН.

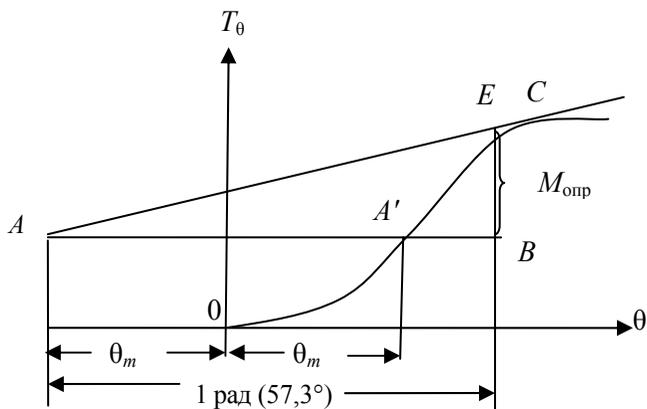


Рис. 7.2

На рис. 7.3 представлен случай, когда $M_{\text{опр}}$ определяется по диаграмме статической остойчивости. Здесь $M_{\text{опр}} = \overline{DOM}$, если диаграмма построена в масштабе плеч, где D – водоизмещение в кН.

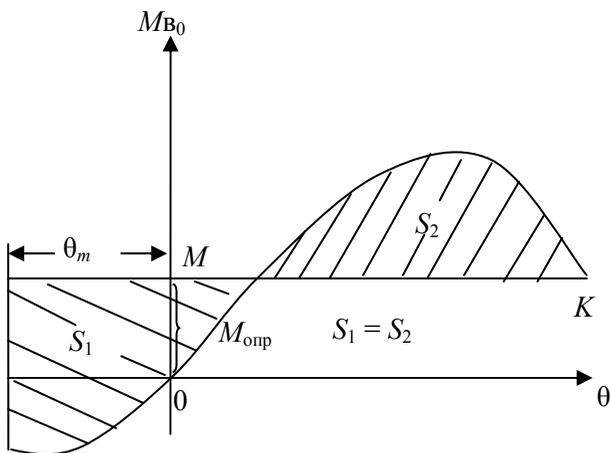


Рис. 7.3

Расчетная амплитуда бортовой качки в градусах для судна с круглой скулой, не имеющего скуловых килей, определяется по выражению

$$\theta_m = XY, \quad (7.9)$$

где функциональная зависимость X определяется особенностями поперечного сечения судна и вычисляется по формуле

$$X = \frac{1}{f_1(u) \sqrt{f_2(u) + \frac{r-a}{B}}}. \quad (7.10)$$

Здесь $f_1(u)$ и $f_2(u)$ – функции от аргумента $u = \alpha \left(1 + \frac{1}{6} \frac{B}{T} \right)$, зависящего от коэффициента полноты грузовой ватерлинии α и отношения ширины судна к осадке $\frac{B}{T}$;

$r - a = h$ – метацентрическая высота.

Значения функции $f_1(u)$ и $f_2(u)$ в (7.10) можно принять по данным, приведенным в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Значения функций $f_1(u)$ и $f_2(u)$

u	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
$f_1(u)$	1,69	2,02	2,34	2,68	3,02	3,36	3,74	4,13	4,48	4,91	5,3
$f_2(u)$	0,672	0,54	0,43	0,35	0,208	0,255	0,22	0,19	0,168	0,15	0,133

Сомножитель Y в (7.10) в зависимости от категории судна и величины $\frac{\sqrt{r-a}}{B}$ принимает значения, приведенные в табл. 7.4.

Таблица 7.4

Значения множителя Y в зависимости от категории судна

$\frac{\sqrt{r-a}}{B}$ Категории судна	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13
I	26,0	26,0	26,4	26,9	28,0	34,2	42,3	51,1	51,1	51,1	51,1
II и III	23,8	23,8	23,8	24,2	25,2	27,1	30,0	34,6	40,6	50,2	51,1

Если судно имеет скуловые кили, то расчетная амплитуда бортовой качки должна быть определена по формуле

$$\theta_{m_1} = K\theta_m, \quad (7.11)$$

в которой коэффициент K определяется в зависимости от аргумента

$$q_1 = \frac{z_g}{T} \frac{S_1}{LB} \left(\frac{d_1}{B} \right)^3,$$

где z_g – возвышение ЦТ судна над основной плоскостью;

S_1 – суммарная площадь скуловых килей;

d_1 – расстояние, измеряемое по миделевому сечению – от ЦТ судна до середины высоты скулового киля;

L, B, T – соответственно длина, ширина и осадка судна.

Коэффициент K имеет значения, приведенные в табл. 7.5

Таблица 7.5

q_i	0	1	2	3	4	5	≥ 6
K	1,00	0,93	0,87	0,80	0,74	0,67	0,81

Если у судна брусковый киль, то расчетная амплитуда качки определяется так же, как и для скуловых килей, только аргумент q_i будет таким:

$$q_2 = \frac{z_g}{T} \frac{S_2}{LB} \left(\frac{d_2}{B} \right)^3 10^3,$$

где S_2 – площадь боковой проекции брускового кия;

d_2 – расстояние, измеренное по миделевому сечению – от ЦТ судна до середины высоты брускового кия.

Если же на судне установлены и скуловые и брусковый кили, то расчетная амплитуда определяется аналогично, но аргумент q_i принимается в этом случае как сумма

$$q_3 = q_1 + q_2.$$

Расчетная амплитуда бортовой качки судна с острой скулой принимается равной 70 % от амплитуды, вычисленной по формуле (7.9).

Если расчетная амплитуда качки судна с круглой или острой скулой, найденная по формуле (7.10) или (7.11), будет больше угла крена θ_n , при котором верхняя непрерывная палуба входит в воду, то она должна быть принята с редуцированным коэффициентом

$$\theta_{m_2} = \frac{\theta_m}{m}.$$

Коэффициент m в зависимости от отношения $\frac{\theta_n}{\theta_m}$ имеет значения, приведенные в табл. 7.6.

Таблица 7.6

Значения коэффициента m в зависимости от отношения $\frac{\theta_n}{\theta_m}$

$\frac{\theta_n}{\theta_m}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
m	0,161	0,312	0,450	0,545	0,630	0,716	0,790	0,860	0,930

В расчетах метацентрическая высота принимается без учета поправок на свободные поверхности жидких грузов.

Если метацентрическая высота менее 0,3 м, то при расчетах θ_m принимают равной $h = r - a = 0,3$ м. Если по расчетам амплитуда θ_m получается меньше 10° , то следует принимать амплитуду $\theta_m = 10^\circ$. На судах с успокоителями θ_m принимают без учета их действия.

Расчетную величину θ_m округляют до целых градусов. Фактически расчетная амплитуда является амплитудой резонансной качки.

Если на проектируемом судне в борту или в верхней палубе есть отверстия без водонепроницаемых закрытий, а также в концевых переборках или палубах надстроек имеются отверстия, считающиеся открытыми, то при построении диаграмм статической и динамической остойчивости их (диаграммы) необходимо доводить до углов, при которых эти отверстия будут входить в воду, то есть до $\theta_{\text{зал}}$ – угла заливаемости (рис. 7.4 и рис. 7.5).

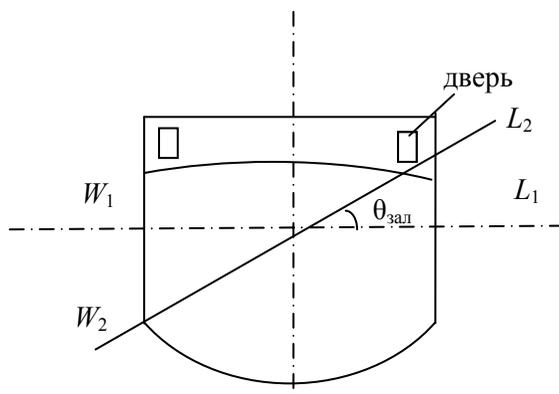


Рис. 7.4. Схема для определения угла заливаемости $\theta_{\text{зал}}$ при крене судна на правый борт

В этом случае диаграммы остойчивости действительны до угла заливаемости, а при больших углах крена диаграммы недействительны и судно считается полностью утратившим остойчивость.

Дополнительные требования к диаграмме статической остойчивости и к начальной остойчивости сводятся к следующему: θ_{max} должен быть не менее 30° ; $\theta_{\text{зал}}$ – не менее 60° (рис. 7.6).

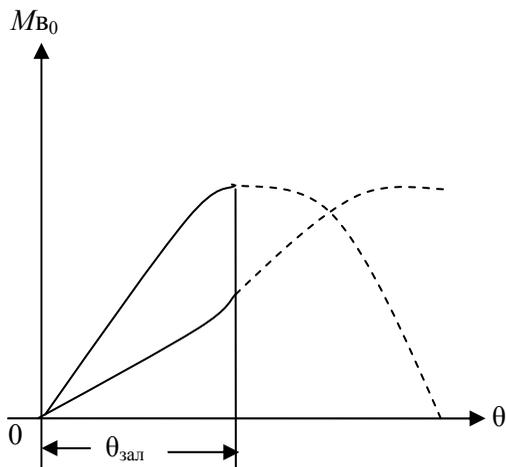


Рис. 7.5. Схема использования ДСО и ДДО при наклонении судна до угла заливания $\theta_{зал}$

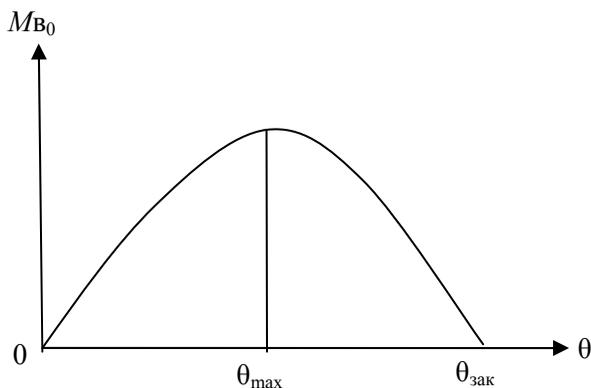


Рис. 7.6. Схема определения углов $\theta_{мах}$ и $\theta_{зак}$ с помощью ДСО

Максимальное плечо статической остойчивости для судов длиной до 100 м должно быть не менее 0,25 м, а для судов длиной свыше 100 м – не менее 0,20 м при крене не менее 30°. Начальная метацентрическая высота всех судов при всех вариантах нагрузки, с учетом свободных поверхностей жидких грузов должна быть положительной.

Опыт показывает, что большие суда остойчивости всегда удовлетворяют требованиям Норм.

Малые суда, особенно первой категории, требуют ряда конструктивных мероприятий для удовлетворения требования Норм остойчивости, и часто для них задачей номер 1 является прием твердого балласта.

7.4. Определение критерия погоды

Остойчивость по критерию погоды K считается достаточной, если площадь b на диаграмме статической остойчивости (работа восстанавливающего момента) больше или равна площади a (работы кренящего момента):

$$K = \frac{b}{a} \geq 1,0.$$

При этом считается, что судно находится под действием ветра на постоянной скорости, направленного перпендикулярно к ДП, которому соответствует плечо ветрового кренящего момента, приложенного статически. Плечи этого момента вычисляются по формуле

$$l_{wl} = \frac{P_v S_{\Pi} z_v}{100 g D}, \text{ м}, \quad (7.12)$$

где P_v – условное давление ветра, Па, определяемое следующим образом: $P_v = 504$ Па, для судов неограниченного плавания; $P_v = 353$ Па, для судов I ограниченного плавания; $P_v = 252$ Па, для судов II ограниченного плавания;

S_{Π} – площадь парусности, м (площадь проекции надводной части судна на ДП);

z_v – аппликата центра парусности, как геометрического ЦТ площади парусности, отсчитываемая от точки, соответствующей осадке на миделе, м;

D – водоизмещение судна, т;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение силы тяжести.

Схема определения площади и центра парусности приведена на рис. 7.7 и в табл. 7.7.

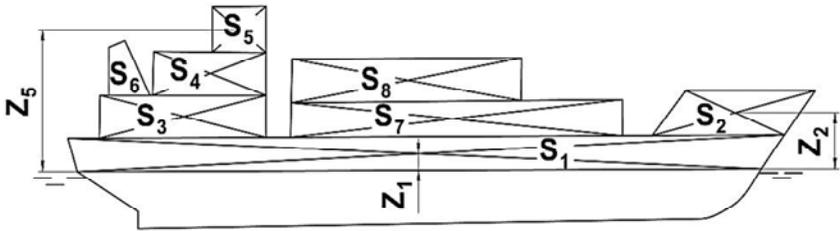


Рис. 7.7. К определению площади и центра парусности
($S_1 - S_8$ – площади проекций боковых поверхностей судна на ДП)

Таблица 7.7

Определение площади и центра парусности

№ п/п	Наименование	Площадь $S_i, \text{м}^2$	Отстояние от условной оси $z_i, \text{м}$	Статический момент $S_i z_i, \text{м}^3$
1	Надводный корпус	S_1	z_1	$S_1 z_1$
2	Бак	S_2	z_2	$S_2 z_2$
3	Надстройка 1-го яруса	S_3	z_3	$S_3 z_3$
4	Надстройка 2-го яруса	S_4	z_4	$S_4 z_4$
5	Рубка	S_5	z_5	$S_5 z_5$
7	Труба	S_6	z_6	$S_6 z_6$
8	Контейнеры 1-го яруса	S_7	z_7	$S_7 z_7$
9	Контейнеры 2-го яруса	S_8	z_8	$S_8 z_8$
	Суммы	ΣS_i	–	$\Sigma S_i z_i$

В площадь парусности должны быть зачислены проекции всех сплошных надстроек и рубок на диаметральной плоскости, проекции мачт, шлюпок, палубных механизмов, а также проекции боковых поверхностей всех грузов, перевозки которых предусматриваются проектом (лес, контейнеры и т. д.).

Парусность несплошных поверхностей (лееров, рангоутов и т. д.) рекомендуется учитывать путем увеличения площади парусности на 5 % и статического момента площади парусности на 10 %.

Окончательно:

$$S_{\text{п}} = 1,05 \sum_i S_i, \quad z_{\text{п}} = \frac{1,1 \sum_i S_i z_i}{1,05 \sum_i S_i}. \quad (7.13)$$

Для судов, плавающих в зимнее время, помимо основного варианта нагрузки, должна быть проверена остойчивость с учетом обледенения. При расчете обледенения следует учитывать изменение водоизмещения, возвышение ЦТ, площади парусности. Масса льда при проверке остойчивости для случая обледенения засчитывается в перегрузку и не включается в дедевит судна.

Массу льда на квадратный метр общей поверхности открытых палуб следует принимать равной 30 кг.

Момент по высоте от этой нагрузки определяется по возвышениям ЦТ соответствующих участков палуб.

Массу льда на квадратный метр площади парусности следует принимать равной 15 кг. Площадь и возвышение ЦТ в этом случае определяется обычным образом.

Кроме ветра, действующего статически, судно подвергается действию шквального ветра с плечом кренящего момента l_{w2} :

$$l_{w2} = 1,5l_{w1}, \text{ м.} \quad (7.14)$$

Для определения площадей a и b необходимо построить диаграмму статической остойчивости. При отсутствии теоретического чертежа ее можно построить приближенным способом по методу В.Г. Власова – С.Н. Благовещенского плечо статической остойчивости l определяется так:

$$l = (z_{c90} - z_{c0})f_1(\theta) + y_{c90}f_2(\theta) + r_0f_3(\theta) + r_{90}f_4(\theta) - (z_{c90} - z_{c0}), \quad (7.15)$$

где z_{c0}, z_{c90}, y_{c90} – координаты центра величины судна в начальном положении и при его наклонении на 90° ;

r_0, r_{90} – малые метацентрические радиусы для судна в прямом и наклоненном на 90° положениях;

$f_i(\theta)$ – вспомогательные функции в зависимости от угла крена θ , приведенные в табл. 7.14;

$$r_0 = \frac{1}{11,4} \frac{\alpha^2 B^2}{\delta T}; \quad r_{90} = 0,70(z_{c90} - z_{c0}); \quad y_{c90} = 0,5 \left(1 - 0,96 \frac{T}{H_1} \right) B;$$

$$z_{c0} = \frac{\alpha}{\alpha + \delta} T; \quad (z_{c90} - z_{c0}) = 0,64 \left(1 - 1,03 \frac{T}{H_1} \right) H_1;$$

H_1 – приведенная высота борта с учетом непроницаемой части надстроек. Если надстройка проницаемая, то $H_1 = H$.

Расчет плеч статической устойчивости l и динамической устойчивости d приведен в табл. 7.14.

По результатам расчетов строится диаграмма статической устойчивости (рис. 7.8).

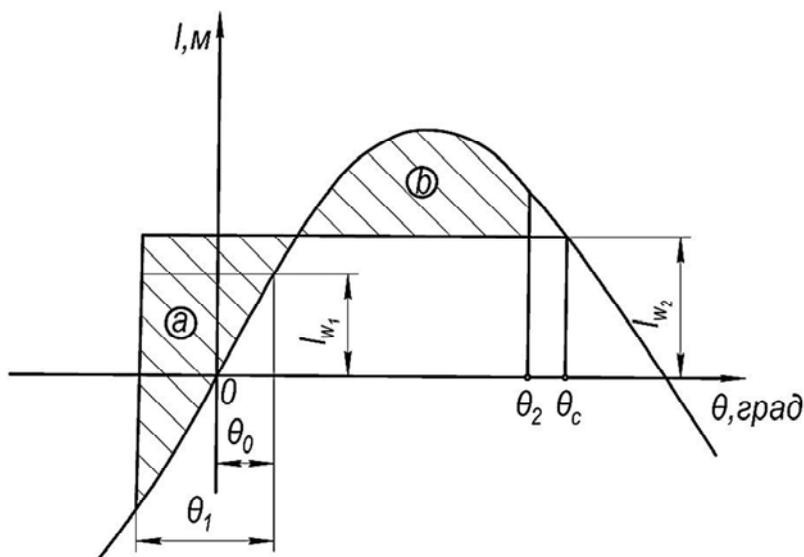


Рис. 7.8. Диаграмма статической устойчивости

Считается, что судно подвергается действию статического ветра с плечом кренящего момента l_{w1} .

От статического угла крена θ_0 , вызванного постоянным ветром и определяемого как точка пересечения горизонтальной линии l_{w1} и кривой плеч статической устойчивости под действием волн, судно

кренится на наветренный борт на угол θ_1 , равный амплитуде бортовой качки.

Угол крена при бортовой качке определяется по формуле

$$\theta_1 = 109kX_1X\sqrt{rS}, \quad (7.16)$$

где k – коэффициент, учитывающий влияние скуловых килей, принимаемый в соответствии с табл. 7.9;

A_K – площадь скуловых килей, м^2 ;

X_1 – безразмерный множитель, определяемый в зависимости от отношения $\frac{B}{T}$ (по табл. 7.10);

X_2 – безразмерный множитель, принимаемый в зависимости от коэффициента общей полноты по табл. 7.11;

r – параметр, равный

$$r = 0,73 + \frac{0,6(z_g - T)}{T}.$$

Значение r не должно приниматься большее единицы; S – безразмерный множитель, определяемый в зависимости от района плавания и периода качки судна по табл. 7.12. Промежуточные значения величин в табл. 7.9 – 7.12 определяются линейной интерполяцией.

Вспомогательные функции и расчетные зависимости для определения плеч статической и динамической остойчивости

Углы крена θ , град.	Функции углов крена θ				Произведения				$l_{\phi}^{\phi} = [6] + [7] + [8] + [9]$, м	$\sin \theta$	$l_{\phi}^{\phi} = z_{\phi}^{\phi} - z_{\phi}^{\phi} \times \sin \theta$, м	Плечи статической остойчивости $l = l_{\phi}^{\phi} - l_{\phi}^{\phi}$, м	Интегральные суммы, Σl , м	Плечи динамической остойчивости $d = \Delta \theta / 2$ [14]
	$f_1(\theta)$	$f_2(\theta)$	$f_3(\theta)$	$f_4(\theta)$	$(\theta) f_1^{\phi} f_2^{\phi} f_3^{\phi} f_4^{\phi}$	$(\theta) f_1^{\phi} f_2^{\phi} f_3^{\phi}$	$(\theta) f_1^{\phi} f_2^{\phi}$	$(\theta) f_1^{\phi}$						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0
10	-0,036	0,050	0,151	0,010	0,010					0,174		l_0	$0 + l_0$	
20	-0,241	0,337	0,184	0,062	0,062					0,342		l_0 l_1	$0 + l_0 + l_0 + l_1$	
30	-0,556	0,840	0,081	0,135	0,135					0,500		l_0 l_1 l_2		
40	-0,722	1,279	-0,069	0,155	0,155					0,643				
50	-0,513	1,365	-0,155	0,069	0,069					0,766				
60	0,026	1,056	-0,135	-0,081	-0,081					0,866				
70	0,603	0,583	-0,062	-0,184	-0,184					0,940				
80	0,935	0,210	-0,010	-0,151	-0,151					0,985				
90	1,00	0	0	0	0					1,000				

Таблица 7.9

Коэффициент k

$\frac{A_k}{LB} 100, \%$	0	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0 и более
k	1,00	0,98	0,95	0,88	0,79	0,74	0,72	0,70

Таблица 7.10

Коэффициент X_1

B/T	2,4 и менее	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,5
X_1	1,0	0,96	0,93	0,90	0,86	0,82	0,80
B/T	3,6	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5 и более
X_1	0,79	0,78	0,76	0,72	0,68	0,64	0,62

Таблица 7.11

Коэффициент X_2

δ	0,45 и менее	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70 и более
X_2	0,75	0,82	0,89	0,95	0,97	1,0

Таблица 7.12

Коэффициент S

	T, c	5 и менее	6	7	8	10	12	14	16	18	20 и более
Неограниченный район плавания	S	0,100	0,100	0,098	0,093	0,079	0,065	0,053	0,044	0,038	0,035
Ограниченный I, II, ПСП, ШСП	S	0,100	0,093	0,083	0,073	0,053	0,040	0,035	0,035	0,035	0,035

Период качки судна T , с, рассчитывается по формуле

$$T = \frac{2cB}{\sqrt{h^*}},$$

где h^* – исправленная метацентрическая высота, м.

Для всех условий начальная метацентрическая высота должна корректироваться с учетом влияния свободных поверхностей жидкостей в соответствии со следующим:

в расчет включаются цистерны, которые при эксплуатации могут иметь свободные поверхности (топливные цистерны, цистерны для пресной воды, сточные цистерны);

в любом случае, если цистерны включаются в расчет, считается, что они заполнены на 50 %;

исправленная метацентрическая высота определяется по формуле

$$h^* = h - \Delta h, \quad \Delta h = \frac{\rho_{ж} i_x}{D},$$

где h^* – исправленное значение метацентрической высоты, м;

Δh – поправка к метацентрической высоте h , м;

$\rho_{ж}$ – плотность жидкости в цистерне, т/м³;

i_x – момент инерции площади свободной поверхности жидкости, м⁴

($i_x = \frac{lb^3}{12}$ для прямоугольной в плане цистерны, l – ее длина, b – ширина).

Если цистерн несколько, то

$$h^* = h - \sum_i \Delta h_i, \quad \sum_i \Delta h_i = \frac{\sum \rho_{жi} i_{xi}}{D}.$$

На кривой (рис. 7.8) проводится линия, соответствующая величине l_{w2} ; определяется угол θ_c . На этой же кривой откладывается угол заливания θ_f .

На этом рисунке:

θ_0 – угол крена от действия постоянного ветра;

θ_1 – угол крена в наветренную сторону;

θ_2 – угол заливания θ_f или угол 50° в зависимости от того, что меньше;

θ_c – угол, соответствующий второму пересечению плеча ветрового кренящего момента с диаграммой остойчивости.

После всех построений на диаграмме определяются площади диаграммы и критерий погоды

$$K = \frac{b}{a} \geq 1,0. \quad (7.17)$$

8. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ЧЕРТЕЖА СУДНА

8.1. Общие сведения

Для проектирования теоретического чертежа необходимо воспользоваться рассчитанными ранее при выполнении проекта элементами [7]: главными размерениями – L, B, T, H ; коэффициентами полноты – δ, α, β ; значениями абсцисс центра величины (ЦВ) судна – x_c и центра тяжести (ЦТ), площади конструктивной ватерлинии (КВЛ) – x_f .

При решении вопросов проектирования обводов необходимо проявить компетентность при выборе их формы, обеспечивающую минимальное сопротивление воды и соответствие другим мореходным и эксплуатационным качествам.

Раздел проекта должен содержать графическую часть и расчеты. Графическая часть должна включать теоретический чертеж судна, выполненный на листе формата А2. Строевая по шпангоутам, КВЛ, гидростатические кривые и другие рисунки могут выполняться на миллиметровой бумаге формата А4 или А3. Кроме графической части, выполняется пояснительная записка, включающая обоснования по выбору формы корпуса, расчеты гидростатических элементов, посадки судна и непотопляемости.

Теоретический чертеж выполняется в масштабе 1 : 50; 1 : 100 или 1 : 200. Сетка теоретического чертежа строится для 21 теоретического шпангоута, 4-х ватерлиний (не считая нулевой) и 2-х батоксов с каждого борта. Особое внимание должно быть обращено на проектирование сетки теоретического чертежа, от которой зависит точность дальнейших построений и расчетов.

Все графические и расчетные материалы должны оформляться в соответствии с требованиями [18].

Кроме шпангоутов, ватерлиний и батоксов, необходимо построить и согласовать палубную и бортовую линии на всех проекциях с учетом погиби бимсов и продольной седловатости.

После построения теоретического чертежа необходимо произвести проверку возможности расположения гребных винтов заданного диаметра в корме судна или определить допустимый диаметр гребного винта.

Для этого на всех трех проекциях наносится линия диска винта и пробивается шпангоут, расположенный в его плоскости. Необходимо соблюдать зазор между верхней кромкой лопасти винта и корпусом судна, который должен быть не менее 0,1 диаметра винта. Возвышение нижней кромки лопасти над основной плоскостью должно быть не менее 0,05 м. По теоретическому чертежу также определяется точка выхода гребного вала.

Все расчеты ведутся в табличной форме по правилу трапеций.

Выбор формы обводов целесообразно проводить с использованием судов-прототипов.

8.2. Проектирование строевой по шпангоутам

Проектирование теоретического чертежа судна начинается с разработки строевой по шпангоутам. При этом используются следующие свойства строевой:

площадь строевой по шпангоутам численно равна объемному водоизмещению судна;

абсцисса центра тяжести строевой численно равна абсциссе ЦВ;

коэффициент полноты площади строевой численно равен коэффициенту продольной призматической полноты судна φ ($\varphi = \delta/\beta$).

Таким образом, необходимо построить строевую, отвечающую этим свойствам в соответствии с проектными элементами судна V , x_c , φ , L , B , T , β .

Покажем последовательно, как это делается для условной строевой, имеющей форму прямолинейной трапеции (рис. 8.1).

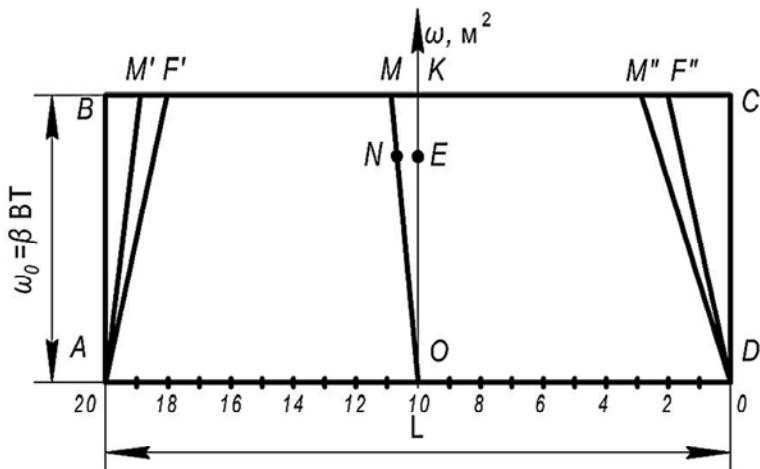


Рис. 8.1. К проектированию строевой по шпангоутам

По горизонтали в выбранном масштабе откладываем отрезок, равный расчетной длине судна L , и разбиваем его на 20 равных теоретических шпаций $\Delta L = L/20$.

По вертикали в другом масштабе откладываем отрезок, численно равный площади мидель-шпангоута $\omega_0 = \beta BT$.

Из точек B и C по горизонтали откладываем отрезки BF' и CF'' , численно равные величине

$$\overline{BF'} = \overline{CF''} = L(1 - \varphi).$$

Очевидно, что площадь прямолинейной трапеции $AF'F''D$ численно равна объемному водоизмещению судна:

$$\frac{\overline{AD} + \overline{F'F''}}{2} \overline{AB} = \frac{L + L - 2L + 2L\varphi}{2} \beta BT = \delta LBT = V = \frac{D}{\rho},$$

то есть выполнено первое свойство строевой по шпангоутам.

Далее надо таким образом перестроить эту трапецию, чтобы выполнялось и второе свойство, то есть требуется построить строевую с заданной абсциссой ЦТ.

Для этого от точки K отложим по вертикали отрезок KE , численно равный

$$\overline{KE} = \beta VT \frac{1}{1 + \varphi}.$$

От точки E по горизонтали откладываем в масштабе длин отрезок EN , численно равный абсциссе ЦВ – x_c , причем в принятом правиле знаков положительное значение x_c откладывается в нос судна, а отрицательное – в корму, то есть $EN = x_c$.

Точку O соединяем с точкой N и на пересечении линий ON и BC получаем точку M . Далее сдвигаем точки F' и F'' на величину отрезка KM в том же направлении, в каком точка M сдвинулась от точки K .

Получаем точки M' и M'' . Соединяя точки A, M', M'', D получим прямолинейную трапецию $AM'M''D$, полностью (что легко проверить) отвечающую всем свойствам строевой.

Дальнейшая задача состоит в том, чтобы придать этой строевой плавные криволинейные образования, соответствующие плавным обводам судна. Для этого обратимся к рис. 8.2, на который перенесены некоторые точки с рис. 8.1.

Но прежде чем приступить к окончательной процедуре построения строевой, необходимо решить вопрос о цилиндрической вставке судна. Цилиндрическая вставка, как следует из ее названия, имеет на своем протяжении одинаковую форму и площадь шпангоутов. Задача сводится к определению протяженности цилиндрической вставки и ее расположения по длине корпуса, то есть необходимо определить длину носового заострения L_N , длину кормового заострения L_K и длину цилиндрической вставки $L_{ЦВ}$.

При их выборе необходимо учитывать, что с увеличением L_N снижается волновое сопротивление, а с увеличением L_K снижается сопротивление формы и улучшается подток воды к гребным винтам. Но их увеличение усложняет форму корпуса, делает ее менее технологичной, ухудшает планировку трюмов, а иногда и уменьшает грузместимость (особенно по генеральным грузам), увеличивает строительную стоимость.

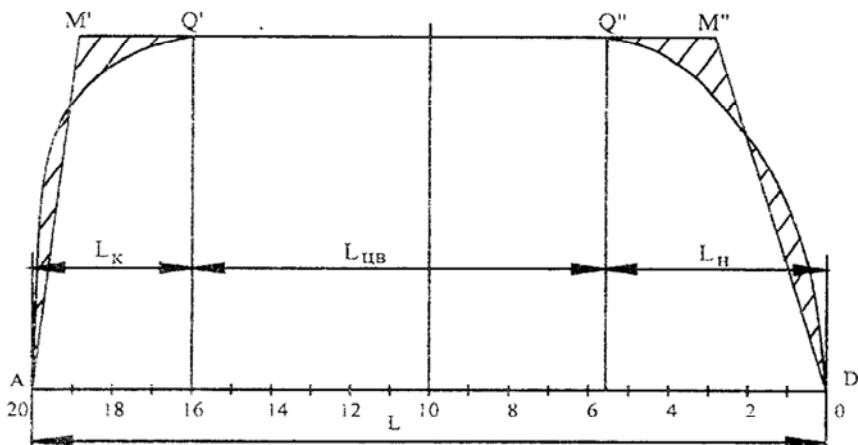


Рис. 8.2. Строевая по шпангоутам

Поэтому на грузовых судах делают цилиндрическую вставку «умеренной» длины, чтобы не ухудшить мореходные качества. Эту «умеренную» длину цилиндрической вставки для судов с большим коэффициентом общей полноты целесообразно выбирать по рекомендациям А. Линдблада [11], показанным на рис. 8.3.



Рис. 8.3. Длина и положение цилиндрической вставки

Используя этот график, можно выбрать L_H , L_K , $L_{ЦВ}$ и полученные отрезки нанести на строевую (см. рис. 8.2, точки $Q'Q''$). Из этих точек надо провести плавные кривые, соединяющие их с точками A и D . При этом надо руководствоваться двумя обстоятельствами:

проводить кривые надо таким образом, чтобы «исключенные» и «приобретенные» участки строевой (заштрихованы) были примерно равны по площади, иначе это приведет к изменению общей площади строевой, а следовательно, и к изменению водоизмещения судна. Обычно это уравнивание проводят «на глаз» с последующей проверкой полученного водоизмещения;

форма носовой и кормовой части строевой оказывает влияние на сопротивление воды движению судна. Для относительно тихоходных судов с большим коэффициентом общей полноты носовую ветвь строевой целесообразно выполнять прямой или слегка выпуклой.

Когда форштевень имеет крутой наклон и большой подрез в нижней части, строевая по шпангоутам не получается прямой или выпуклой. Она несколько вогнута на коротком участке у форштевня, что почти не влияет на волновое сопротивление.

При обработке формы кормового заострения важно избежать вихреобразования и обеспечить хороший подток воды к гребным винтам. Строевая по шпангоутам здесь должна быть, возможно, ближе к прямой. Переход к цилиндрической вставке в кормовой части должен быть более длинным и постепенным, чем у носовой ветви строевой.

При выборе длины цилиндрической вставки в кормовой половине судна можно воспользоваться формулой Беккера

$$l_k = \frac{l_{ц.к}}{L} = 0,5 - 4,1 \frac{B}{L} \sqrt{\beta \frac{T}{B}},$$

где $L_{ц.к}$ и l_k – абсолютная и относительная длина цилиндрической вставки в кормовой части судна;

L – длина судна между НП и КП (см. рис. 8.2).

При выборе длины цилиндрической вставки в носовой половине судна при числах Фруда, меньших $F_r = 0,19 \div 0,20$, иначе говоря, при коэффициентах общей полноты, превышающих $\delta = 0,71 \div 0,73$, пред-

ставляется целесообразным принимать ее значения выше тех, которые получаются при вычислении по формуле

$$l_n = \frac{l_{\text{шп}}}{L} = 0,5 - 10,4\text{Fr}^2,$$

При больших числах Фруда ($\text{Fr} > 0,2$) и меньших коэффициентах общей полноты целесообразно принимать ее значения меньше тех, которые получаются при вычислении по формуле

$$l_n = 0,5 - 8,4\text{Fr}^2.$$

При крейсерской корме на строевой у кормового перпендикуляра всегда получается вогнутость, чего не следует опасаться. Крейсерская корма служит, главным образом, для возможно большего продления верхних ватерлиний в корму и предотвращения этим вихреобразования. Кроме того, это увеличивает площадь главной палубы в корме и позволяет разместить на ней кормовые судовые устройства.

На рис. 8.4 показаны рекомендуемые ветви строевой по шпангоутам.

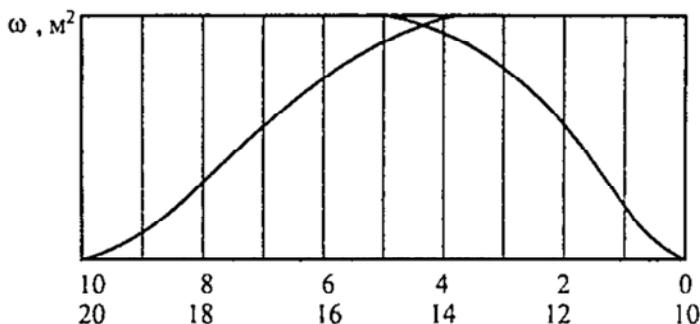


Рис. 8.4. Строевая по шпангоутам

Далее необходимо проверить водоизмещение проектируемого судна, вычисленное по строевой по шпангоутам.

Для этого надо вычислить площадь строевой так, как показано в табл. 8.1.

Вычисление площади строевой

Номера шпангоутов I	0	1	2	3	...	19	20			
Площади шпангоутов ω_i , м ²	ω_0	ω_1	ω_2	ω_3	...	ω_{19}	ω_{20}	$\sum_{i=0}^{20} \omega_i$	Δ	$\sum_{i=0}^{20} * \omega_i$

Площади шпангоутов ω_i в таблице берутся как ординаты строевой, затем вычисляется их сумма $\sum_{i=0}^{20} \omega_i$, поправка на полусумму крайних

членов $\Delta = \frac{\omega_0 + \omega_{20}}{2}$ и исправленная сумма $\sum_{i=0}^{20} * \omega_i = \sum_{i=0}^{20} \omega_i - \Delta$.

Объемное водоизмещение $V = \Delta L \sum_{i=0}^{20} * \omega_i$.

Погрешность между вычисленным по строевой водоизмещением и его исходной величиной не должна превышать 0,5 %. Если разность превышает 0,5 %, необходимо несколько перестроить строевую, но такое бывает редко. Одна из причин несовпадения величин может заключаться в погрешности приближенного вычисления площади. Иногда избежать этого удастся введением промежуточных (0,5; 1,5; 2,5 и т. д.) ординат в районах заострений.

8.3. Построение конструктивной ватерлинии

После построения строевой по шпангоутам переходят к построению КВЛ (рис. 8.5). Способ ее построения вполне аналогичен предыдущему, с той лишь разницей, что вместо ординаты на миделе $\omega = \beta VT_{\otimes}$ откладывают величину $B/2$; вместо коэффициента ϕ надо подставить коэффициент полноты площади КВЛ α и вместо $x_c \rightarrow x_f$.

Ватерлинии должны иметь примерно такой же характер, как и строевая по шпангоутам. Это особенно относится к носовому заострению, где КВЛ должна быть прямой или слегка выпуклой. На небольшой длине непосредственно у кормы иногда приходится принимать слегка вогнутую форму. Углы входа носовой ветви КВЛ рекомендуется принимать 34–36°.

Нет необходимости заострять у концов кормовые ветви КВЛ. Ее форма должна предотвращать отрыв пограничного слоя.

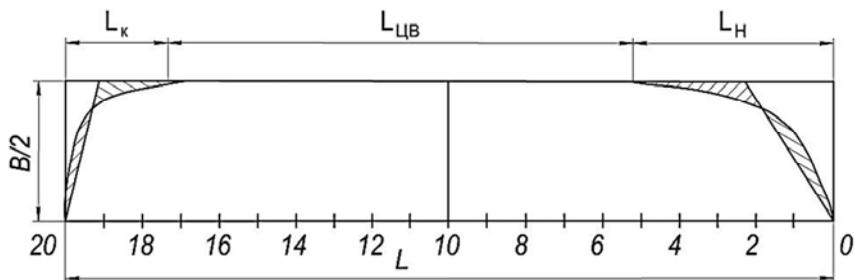


Рис. 8.5. Схема построения КВЛ

8.4. Проектирование носовых и кормовых обводов судна

При построении обвода диаметрального батокса выбирают рациональную форму форштевня, ахтерштевня и параметры седловатости верхней палубы.

Форштевни судов в их подводной части выполняются, как правило, прямыми, обычно наклонными или вертикальными. При выборе их обводов полезно руководствоваться прототипами.

Более подробно остановимся на форштевнях бульбообразной и цилиндрической формы, получивших большое распространение в последнее время.

Основными характеристиками бульбов является их форма, протяженность и развитость (рис. 8.6).

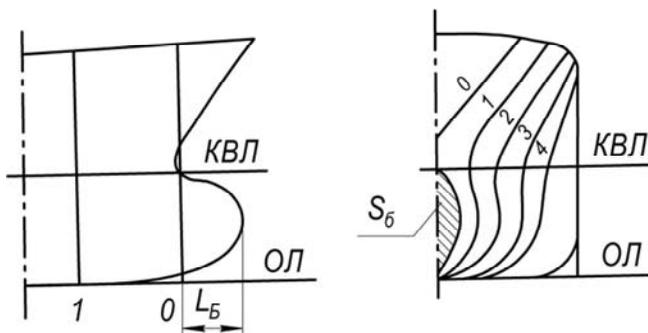


Рис. 8.6. Схемы для определения характеристик бульба

Формы бульбов бывают груше- и каплеобразные, таранно-конические и цилиндрические. Наибольшее распространение получила каплеобразная форма. Протяженность бульба измеряется в долях длины корпуса судна $\bar{l}_\delta = L_\delta/L$, а развитость – коэффициентом бульбообразности $f_\delta = \omega_\delta/\omega_\otimes$ (ω – площадь поперечного сечения бульба на носовом перпендикуляре).

Максимальный выигрыш в сопротивлении (13–15 %) достигается при $\omega_\delta = (15–16)\%$ при значении числа Фруда $Fr = 0,3$, где

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}}; \quad v - \text{скорость судна}; \quad g - \text{ускорение свободного падения.}$$

Однако на практике применяют меньшие бульбы с $\omega_\delta = (5–6)\%$, что приводит к уменьшению сопротивления на (5–8) %. Объясняется это тем, что сильно развитые бульбы неудобны в эксплуатации (затрудняют маневрирование судов, их швартовку, небезопасны они и для находящихся рядом судов).

Влияние бульба на сопротивление судов можно оценить по рис. 8.7, построенному применительно к коэффициенту бульбообразности $f_\delta = 5\%$. Из рисунка следует, что при определенных соотношениях между полнотой и относительной скоростью судна применение бульба может привести к отрицательным результатам – увеличению сопротивления. На рис. 8.7 R – сопротивление движению судна, ΔR – изменение сопротивления.

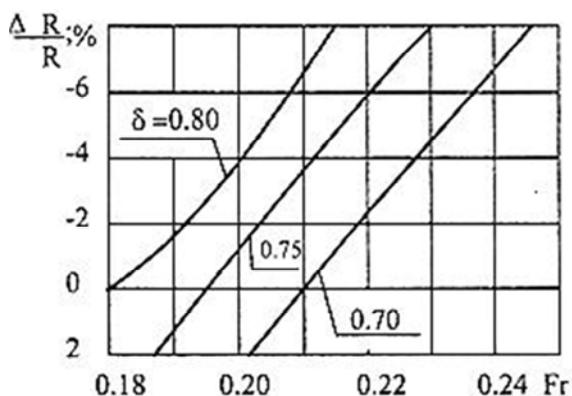


Рис. 8.7. Влияние бульба на изменение сопротивления

Носовые бульбы применяются на судах для снижения сопротивления.

У относительно быстроходных судов ($Fr > 0,25$) положительное влияние бульба достигается за счет благоприятной интерференции волновых систем, создаваемых бульбом и корпусом судна. Для таких судов характерны каплеобразные бульбы.

Развитые носовые бульбы характерны и для относительно тихоходных полных судов ($Fr < 0,2$). Применение бульба позволяет сместить часть объема в носу в прикильную область и тем самым заострить ватерлинии вблизи КВЛ, что приводит к уменьшению размеров носовой подпорной волны.

Кроме того, улучшаются условия обтекания корпуса вследствие выравнивания набегающего потока воды и уменьшается интенсивность скуловых вихрей, связанная с уменьшением перетока воды от бортов к днищу.

Необходимо также иметь в виду, что помимо отмеченных ранее недостатков, вызываемых бульбами, имеются и другие: увеличение трудоемкости постройки судна, повышение сопротивления при ходе в балласте, более тяжелые последствия слеминга. Развитый бульб также затрудняет отдачу якорей, что приводит к необходимости устраивать на судах громоздкие наделки на якорных клюзах.

Альтернативой носовым бульбам служат цилиндрические носовые обводы или обводы с цилиндрическим форштевнем (рис. 8.8).

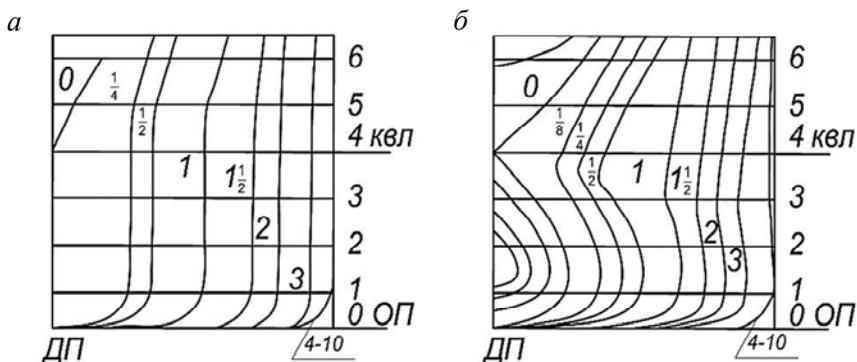


Рис. 8.8. Обводы корпуса в носовой оконечности:
а – цилиндрические образования; *б* – таранно-конические образования

Такие обводы целесообразны у очень полных тихоходных судов с $\delta > 0,8$ и $Fr < 0,20$.

Положительный эффект носовых цилиндрических обводов связан с уменьшением кривизны носовых участков ватерлиний, что обеспечивает более плавный переход от носового заострения к цилиндрической вставке, что снижает интенсивность волнообразования. Вследствие своей простоты цилиндрические обводы имеют существенные технологические преимущества.

Для цилиндрической формы носа характерными параметрами являются: относительная ордината строевой по шпангоутам на носовом перпендикуляре f ; радиус закругления грузовой ватерлинии (ГВЛ) $\bar{r}_1 = r_1 / \frac{B}{2}$; радиус закругления скулы $\bar{r}_2 = r_2 / T$.

Рекомендуемые оптимальные значения относительной ординаты – $f_{\text{опт}}$ находятся в пределах 0,065–0,105. Для выбора относительного радиуса \bar{r}_1 может быть использован график, приведенный на рис. 8.9.

На рис. 8.9, б показаны рекомендуемые значения \bar{r}_2 , выбор которого имеет важнейшее значение для предотвращения волнообразования.

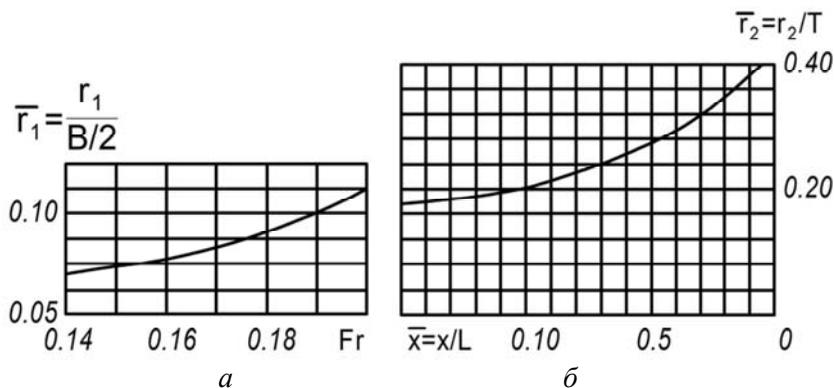


Рис. 8.9. Рекомендуемые значения радиуса закругления носовой ветви ГВЛ a и b – скулы танкера корпуса с цилиндрическими обводами

Выбор формы кормовой оконечности – комплексная задача, в которой решаются вопросы снижения сопротивления, хорошего взаи-

модеиствия движителя с корпусом, уменьшения неоднородности потока в диске гребного винта и, наконец, обеспечения хороших характеристик управляемости судна.

Корма морских судов и ахтерштевень обычно имеют крейсерскую форму. Обводы крейсерской формы отличаются разной полнотой, протяженностью и кривизной свеса. Наибольшее распространение получила крейсерско-транцевая форма кормы, позволяющая упростить технологию постройки судна, уменьшить вибрацию кормовой оконечности. Чтобы избежать повышения сопротивления, нежелательно значительное погружение транца в воду (рис. 8.10).

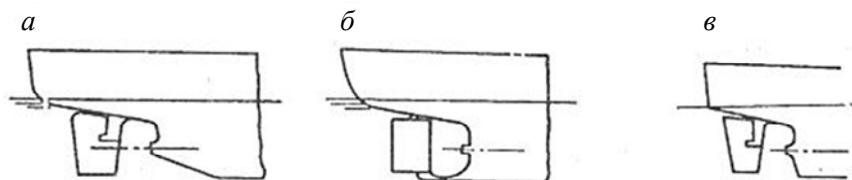


Рис. 8.10. Крейсерская и крейсерско-транцевая корма:
а, б – крейсерская открытая и закрытая; в – крейсерско-транцевая корма

На более быстроходных судах с числами Фруда $Fr = 0,20 \div 0,25$ ($\varphi = 0,60 \div 0,70$) преимущество крейсерской кормы проявляется в работе гребных винтов. Выигрыш от применения крейсерской кормы составляет (в зависимости от относительной скорости и полноты судна) 2–4 % от мощности, подводимой к винту.

Большое преимущество крейсерской кормы – в наличии дополнительных объемов, которые используются для размещения рулевого привода и служебных помещений, но в технологическом отношении она сложнее.

Линия, ограничивающая кормовой свес в боковой проекции, должна подходить наклонно к ахтерштевню, поскольку при горизонтальном свесе нельзя придать кормовым шпангоутам достаточно плавную форму. Длина кормового свеса по палубе обычно составляет 3,5–4,5 %, а по грузовой ватерлинии 2–3 % от длины судна между перпендикулярами.

Быстроходные суда строятся с транцевой кормой, за которой не наблюдается подъема воды, как это происходит при крейсерской, так как обтекание кормы происходит по батоксам.

Разновидностью может быть такая форма кормы, при которой транец несколько наклоняется по отношению к горизонтальной плоскости и к диаметрале, что улучшает условия обтекания корпуса на заднем ходу.

Для одновальных судов применяются *U*-образные, *V*-образные и сигарообразные кормовые обводы (рис. 8.11).

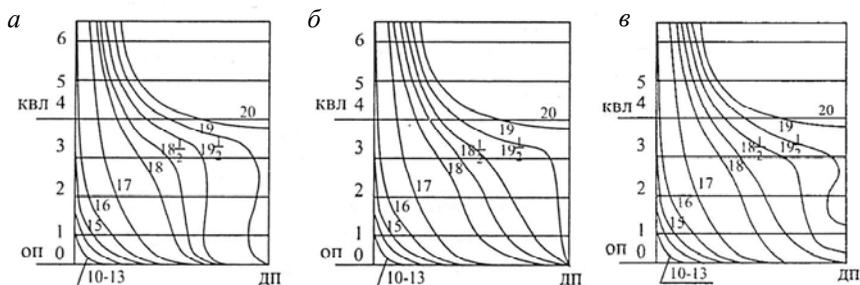


Рис. 8.11. Характерные формы кормовой оконечности танкеров:
a – *U*-образная корма; *б* – *V*-образная корма; *в* – сигарообразная корма

В надводной части корпуса носовым шпангоутам следует придавать умеренный развал, способствующий вхождению судна на волну и предотвращению вкатывания больших масс воды на палубу. Однако чрезмерный развал при быстром вхождении в воду образует брызговую пелену, попадающую на надстройки, что усложняет управление судном.

Далее необходимо решить вопрос о седловатости палубы и погни бимсов. В отношении седловатости необходимо руководствоваться Правилами Регистра (рис. 8.12).

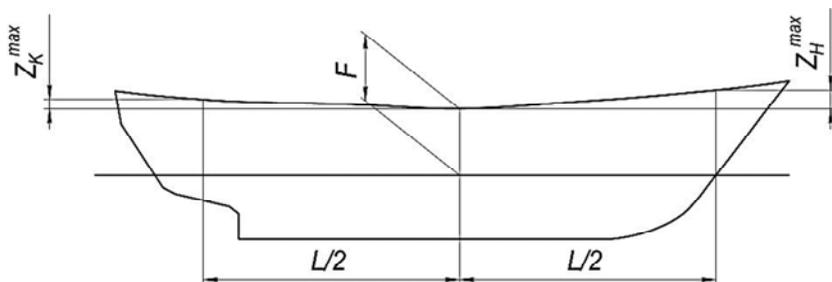


Рис. 8.12. Стандартная седловатость по Правилам Регистра

Форма проекции бортовой линии на диаметрально плоскость задается квадратными параболой с нулевой аппликатой на середине длины.

Ординаты стандартного профиля седловатости F в мм приведены в табл. 8.2, где L – длина судна измеряется в метрах.

Таблица 8.2

Ординаты стандартного профиля седловатости

	В носовой половине	В кормовой половине
Носовой перпендикуляр (НП)	$50\left(\frac{L}{3} + 10\right)$	$25\left(\frac{L}{3} + 10\right)$
1/6 НП	$22,2\left(\frac{L}{3} + 10\right)$	$11,1\left(\frac{L}{3} + 10\right)$
1/3 НП	$5,6\left(\frac{L}{3} + 10\right)$	$2,8\left(\frac{L}{3} + 10\right)$

Седловатость усложняет постройку судна, мешает укладке палубного груза.

Если суда имеют избыточный надводный борт (то есть высота надводного борта у них превышает величину минимального надводного борта плюс носовую ординату стандартной седловатости), то отпадает необходимость проектировать судно с седловатостью палубы.

Правила о грузовой марке регламентируют минимальную высоту в носу.

Высота в носу z_n , определяемая как расстояние по вертикали на носовом перпендикуляре между ватерлинией, соответствующей назначенному летнему надводному борту при наибольшем расчетном дифференте на нос, должна быть не меньше величины (в мм), определяемой по формуле

$$z_n \geq \frac{56\left(1 - \frac{L}{500}\right)}{1,36(+0,68)}.$$

Если эта высота достигается за счет надстройки, то такая надстройка должна простирается от форштевня до точки, расположенной

на расстоянии не менее $0,07L$ в корму от носового перпендикуляра и должна быть закрытой.

Часто на судах главная палуба имеет погибь бимсов, которую выполняют также в виде параболы. Ее цель упростить эвакуацию воды с палубы, повысить устойчивость при сжатии палубных перекрытий. Максимальную стрелку погиби принимают равной $\frac{1}{50}B$.

Борта судна чаще всего выполняются вертикальными, а днище – горизонтальным. Участок борта, сопряженный с днищем, называют скулой, и в районе миделя выполняют его цилиндрическим. Радиус скулы рекомендуется принимать по формуле

$$r = 1,525\sqrt{(1-\beta)BT}.$$

8.5. Построение теоретического чертежа судна

После завершения всех подготовительных работ, суть которых изложена в предыдущих разделах, приступают к построению теоретического чертежа. Начинают выполнение этой работы с вычерчивания сетки теоретического чертежа.

Графическое оформление теоретического чертежа должно соответствовать требованиям ГОСТ 2.419-98 «Правила выполнения документации при плазовом методе производства» и ГОСТ 1062-98 «Размерений надводных кораблей и судов главные».

Применительно к сетке теоретического чертежа эти требования сводятся к следующему: проекции теоретического чертежа, именуемые «корпус», «бок» и «полуширота», располагают так, чтобы проекция «бок» располагалась в верхнем левом углу, справа от нее – проекция «корпус», под проекцией «бок» – проекция «полуширота». Наименование проекций на чертеже не указывают. Нос судна изображают справа.

Сетка теоретического чертежа, состоящая из прямых линий, представляющих собой проекции батоксов, ватерлиний и шпангоутов, строится на базе длины между перпендикулярами, ширины и высоты борта на мидель-шпангоуте. Количество теоретических шпангоутов, делящих корпус судна между носовым и кормовым перпендикулярами на 20 равных частей, равно 21. Количество батоксов и ватерлиний, располагаемых по ширине и высоте корпуса на равных расстояниях

не регламентируется: обычно проводят 2–3 батокса от ДП к борту и 4–5 ватерлиний, включая нулевую, в пределах расчетной осадки.

Нулевой шпангоут совпадает с носовым перпендикуляром, двадцатый – с кормовым. При этом носовой перпендикуляр проходит через точку пересечения ДП с КВЛ, а кормовой совпадает с осью баллера руля. Если руль расположен не в ДП (у двухвинтовых судов), кормовой перпендикуляр проводится на расстоянии 96 % длины КВЛ от носового перпендикуляра. Для судов с крейсерско-транцевой кормой, погруженной ниже уровня КВЛ, допускается кормовой перпендикуляр проводить через нижнюю точку боковой проекции среза транца.

На проекциях «бок» и «корпус» шпангоуты доводят до бортовой линии верхней палубы и наносят две-три ватерлинии выше расчетной осадки. Батоксы нумеруют римскими цифрами, шпангоуты и ватерлинии – арабскими.

Построение теоретического чертежа начинают с проекции «корпус». Основой для построения каждого шпангоута является его площадь ω_i , снимаемая со строевой по шпангоутам; ордината полушироты y_i , снимаемая с обвода КВЛ; текущая осадка, снимаемая с обвода диаметрали. По значениям этих величин строят равновеликие половине площади каждого шпангоута прямоугольники (рис. 8.13).

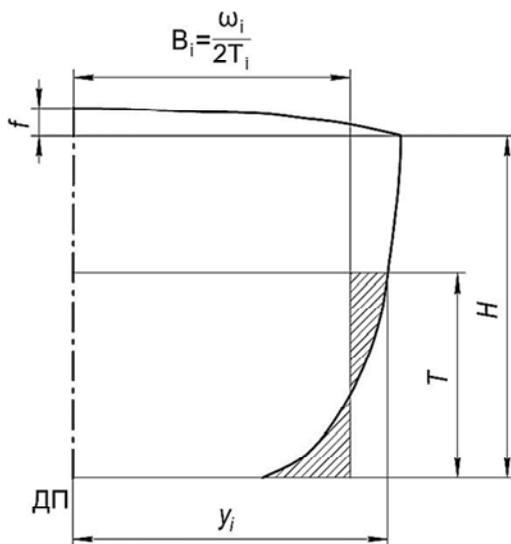


Рис. 8.13. Схема построению шпангоутов на проекции «корпус»

Ширина вспомогательных прямоугольников $B_i = \omega_i / (2T_i)$, а ординату КВЛ на i -м шпангоуте снимают с эскиза КВЛ. Форму шпангоутов изображают с учетом теоретического чертежа прототипа или по приведенным ранее рекомендациям.

Описанную процедуру повторяют для всех шпангоутов. После этого, используя полученную проекцию «корпус», приступают к вычерчиванию всех ватерлиний и батоксов. Все проекции необходимо тщательно согласовать. При согласовании иногда возникает необходимость ввести коррекцию на изображение кривых. Это делают, добиваясь плавности всех обводов.

На рис. 8.14–8.18 в качестве примера приведены теоретические чертежи с характерными обводами одновинтовых и двухвинтовых судов.

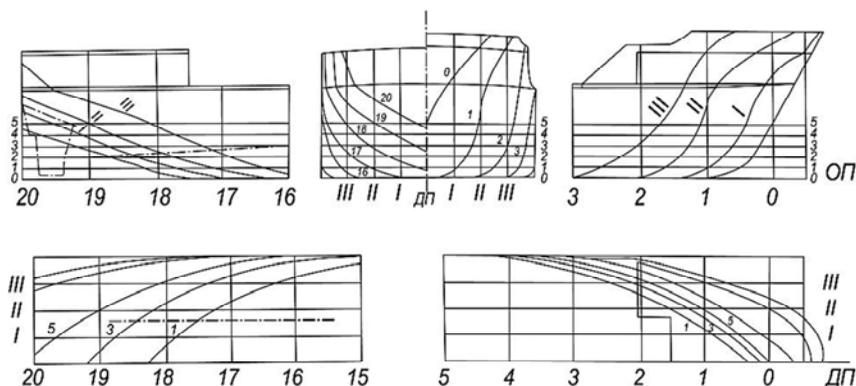


Рис. 8.14. Теоретический чертеж сухогрузного теплохода проекта 19610 с основными характеристиками:
 $L = 134,02$ м; $B = 16,4$ м; $T = 4,5$ м; $H = 6,7$ м; $D = 8595$ т; $\delta = 0,848$

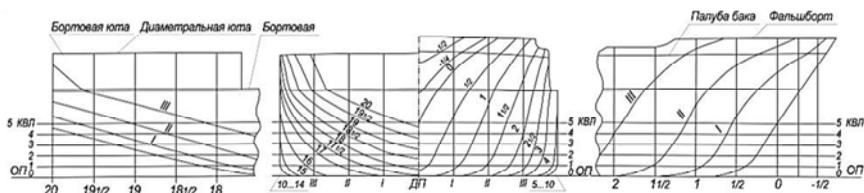


Рис. 8.15. Теоретический чертеж двухвинтового сухогрузного теплохода с прямым наклонным форштевнем

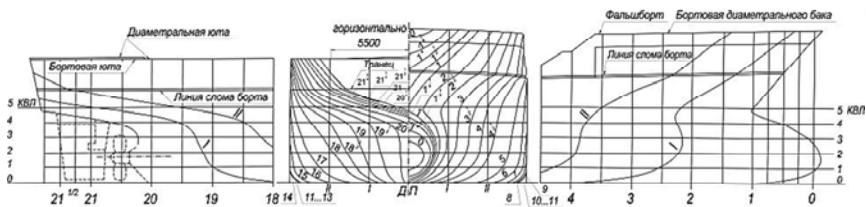


Рис. 8.16. Теоретический чертеж одновинтового сухогрузного теплохода

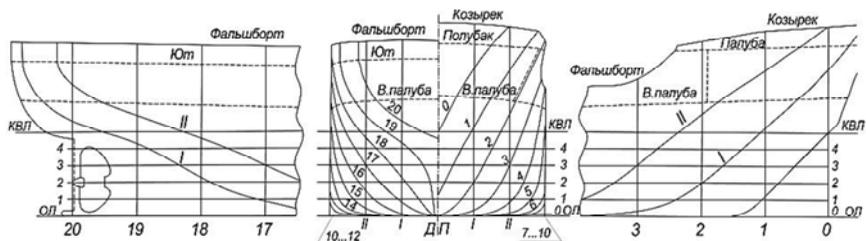


Рис. 8.17. Теоретический чертеж судна проекта 1574
с основными характеристиками:
 $L = 75,00$ м; $B = 12,5$ м; $H = 5$ м; $D \geq 3413$ т; $\delta = 0,710$

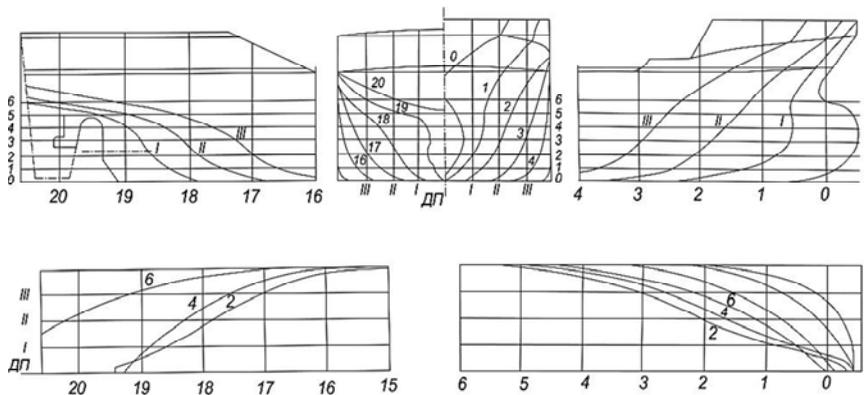


Рис. 8.18. Теоретический чертеж судна проекта 130

Для упрощения работы по проектированию теоретического чертежа полезно в том же масштабе, в котором выполнен «корпус» на миллиметровой бумаге формата А4, прорисовать ватерлинии на три

шпангоута в носу и в корме, причем их ветви можно совместить. Здесь же целесообразно показать линию форштевня и ахтерштевня. Все элементы необходимо согласовать. После проведения такой предварительной работы можно приступить к выполнению теоретического чертежа на формате А2.

8.6. Определение гидростатических элементов

Используя теоретический чертеж, можно вычислить все его гидростатические элементы: площади ватерлиний S ; объемное водоизмещение V ; абсциссы центра величины (ЦВ) x_c и центра тяжести (ЦТ) x_f площадей ватерлиний; аппликаты ЦВ z_c ; метацентрические радиусы r , R и зависимость этих элементов от осадки.

Вычисления элементов производятся по способу трапеций.

Вначале вычисляются элементы каждой ватерлинии теоретического чертежа. Вычисления удобно производить в табличной форме. Схема вычислений представлена в табл. 8.3. Количество таких таблиц соответствует количеству ватерлиний.

Таблица 8.3

Вычисление элементов ватерлиний

№ теоретического чертежа	№ плеча I	Ординаты Y , м	Кубы ординат Y^3 , м ³	Произведение iY , м	Произведение i^2Y , м
1	2	3	4	5	6
0	+10				
1	+9				
2	+8				
3	+7				
4	+6				
5	+5				
6	+4				
7	+3				
8	+2				
9	+1				
10	0				
11	-1				

1	2	3	4	5	6
12	-2				
13	-3				
14	-4				
15	-5				
16	-6				
17	-7				
18	-8				
19	-9				
20	-10				
Суммы					
Поправки					
Исправленные суммы		$\sum *y_i$	$\sum *y_i^3$	$\sum *iy_i$	$\sum *i^2 y_i$
Площадь ватерлинии $S = 2\Delta L \sum_0^i *y_i, \text{ м}^2$					
Момент инерции площади относительно оси x $J_x = \frac{2}{3} \Delta L^* y_i^3, \text{ м}^4$					
Момент инерции площади относительно оси y $J_v = 2(\Delta L)^3 \sum_0^i *i^2 y_i, \text{ м}^4$					
Абсцисса ЦТ площади ватерлинии $x_j = \Delta L \frac{\sum_0^i *i Y_i}{\sum *Y_i}, \text{ м}$					
Центральный момент инерции, проходящий через ЦТ площади ватерлинии, относительно оси, параллельной y, $J_f = J_v - Sx_f^2, \text{ м}^4$					

В результате вычислений для каждой ватерлинии определены величины J_y, J_f, J_x, S, x_f .

Остановимся на одной важной детали вычислений приведенных ординат – ординат, не примыкающих к линиям теоретических шпангоутов.

Концевые приведенные ординаты увеличивают точность расчетов и вводятся в случаях значительной кривизны концевых корабельных кривых и несовпадения точек притыкания их с узлами сетки. Способы проведения концевых ординат показаны на рис. 8.19.

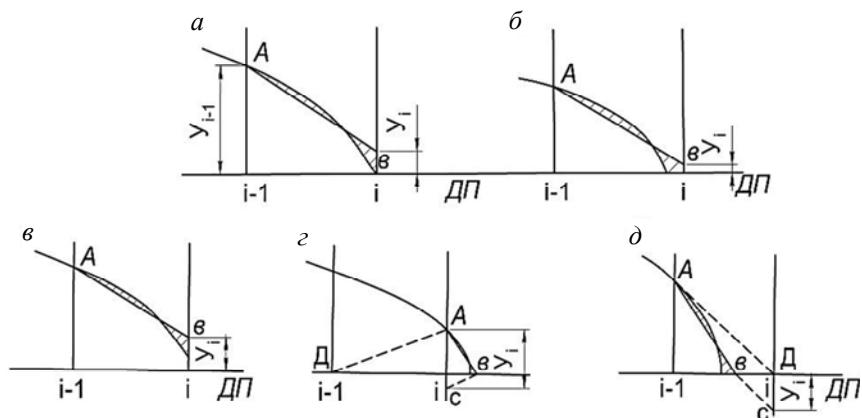


Рис. 8.19. Способы проведения концевых ординат

Построения проводят в следующем порядке. Соединяют точки A и B прямой линией таким способом, чтобы заштрихованные на чертеже площади были равны. Оценка равенства площадей производится с привлечением компьютерных технологий. В случаях $a, б, в$ приведенная концевая ордината \bar{y}_i равна длине отрезка \overline{BC} . Для случаев $г$ и $д$ проведем вспомогательную прямую \overline{BC} , параллельную \overline{AD} . Приведенная концевая ордината равна для случая $г$ длине отрезка \overline{AC} , а для случая $д$ – длине отрезка \overline{CD} , взятой со знаком минус.

По результатам вычислений, выполненных для ватерлиний, и в сводной табл. 8.4 строят на миллиметровой бумаге гидростатические кривые, приведенные на рис. 8.20.

Таблица 8.4

Вычисление элементов теоретического чертежа

№ ВЛ	Площадь ВЛ $S, \text{ м}^2$	Интегральные суммы	$V = \frac{1}{2} \Delta T \times \times (3), \text{ м}^3$	$x_p, \text{ м}$	$S \cdot x_p = (2) \times (5), \text{ м}^2$	Интегральные суммы $\sum'' (6)$	$x_c = \frac{\Delta T}{2} \times \times (7), \text{ м}$	(1) × (2)	Интегральные суммы $\sum'' (9)$	$z_c = \frac{\Delta T}{2} \times \times (10), \text{ м}$	J_{x0}	J_{x1}	J_{x2}	J_{x5}	$r = \frac{(12)}{4}, \text{ м}$	$r = \frac{(13)}{4}, \text{ м}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
0	S_0	0	0	x_{p0}		0	–	0	0	0	J_{x0}	J_{p0}	–	–		
1	S_1	$0 + S_0 + S_1$	V_1	x_{p1}			x_{c1}	...		z_{c1}	J_{x1}	J_{p1}				
2	S_2	$0 + S_0 + S_1 + S_2$	V_2	x_{p2}			x_{c2}			z_{c2}	J_{x2}	J_{p2}	r_2	R_2		
3		...	V_3	...				...	...	...			...	...
4 (КВЛ)	...	...		...			...	...	...	...			...	...
5	S_5	...	V_5	x_{p5}		...	x_{c5}	...		z_{c5}	J_{x5}	J_{p5}	r_5	R_5		

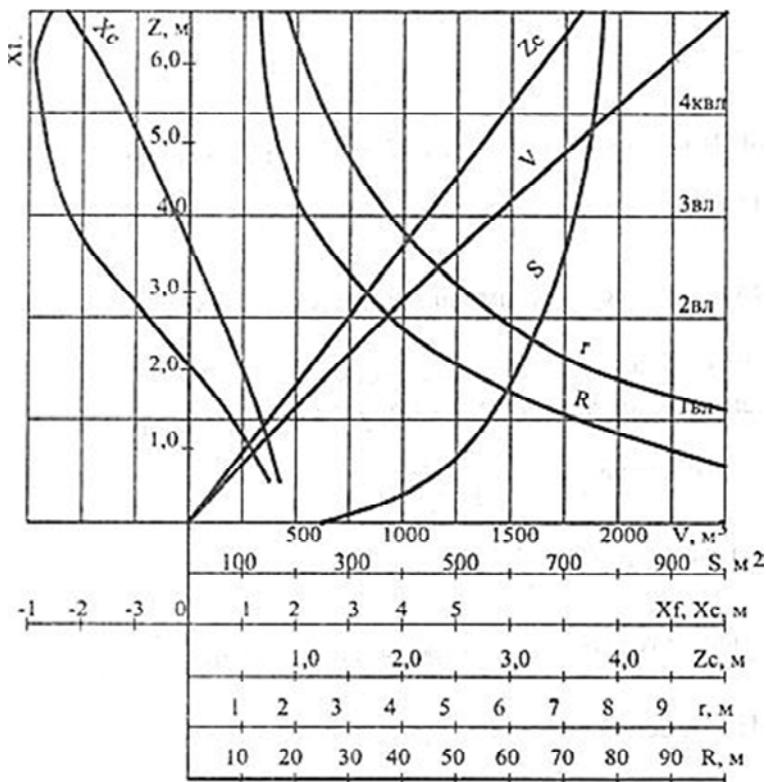


Рис. 8.20. Гидростатические кривые

Эти кривые являются исходными для вычисления плавучести, устойчивости, непотопляемости и качки корабля.

8.7. Аффинное перестроение чертежа прототипа

В практике проектирования широко применяется получение теоретического чертежа проекта перестроением чертежа прототипа. Наиболее простой способ перестроения теоретического чертежа – его аффинное преобразование. Такое преобразование возможно только в том случае, когда изменяются L , B и T , а δ и другие коэффициенты полноты остаются неизменными. При этом водоизмещение, положение центра величины, метацентрические радиусы

и другие элементы чертежа легко вычисляются по простым формулам, основанным на частичном подобии получаемой формы судна его исходной форме.

Можно рассматривать частный случай такого преобразования, когда меняется только B . Тогда ординаты нового чертежа получаются умножением исходных ординат на коэффициент $b_a = \frac{B_1}{B_0}$, где индекс «0» относится к исходному, а «1» – к проектируемому чертежу. Таким образом, $y_1 = b_a y_0$. Построение такого чертежа чрезвычайно просто, плавные линии прототипа остаются плавными и у проекта.

В том случае, когда изменяется только осадка, построение нового чертежа заключается лишь в изменении расстояния ΔT между ватерлиниями, которое определяется из выражения

$$t_a = \frac{T_1}{T_0} = \frac{\Delta T_1}{\Delta T_0}.$$

Из аналогичного выражения определяется расстояние между теоретическими шпангоутами ΔL при изменении длины судна:

$$l_a = \frac{L_1}{L_0} = \frac{\Delta L_1}{\Delta L_0}.$$

В общем случае изменяются L , B и T , при этом в чертеже ординаты y изменяются пропорционально $b_a = \frac{B_1}{B_0}$; расстояния между

ВЛ пропорционально $t_a = \frac{T_1}{T_0} = \frac{\Delta T_1}{\Delta T_0}$ и расстояния между теоретиче-

скими шпангоутами пропорционально $l_a = \frac{L_1}{L_0} = \frac{\Delta L_1}{\Delta L_0}$.

Для этого общего случая будем иметь: коэффициенты полноты δ , α , β , $\varphi = \delta/\beta$, $\chi = \delta/\alpha$ неизменными;

объемное водоизмещение $V_1 = \frac{L_1 B_1 T_1}{L_0 B_0 T_0} V_0$;

площадь ватерлиний $S_{j1} = \frac{L_1 B_1}{L_0 B_0} S_{j0}$;

площади шпангоутов (ординаты строевой по шпангоутам)
 $\omega_{j1} = \frac{L_1 B_1}{L_0 B_0} \omega_{j0}$;

отстояние ЦВ от основной линии $z_{c1} = \frac{T_1}{T_0} z_{c0}$;

отстояние ЦВ от середины L (обычно десятого шпангоута)
 $x_{c1} = \frac{L_1}{L_0} x_{c0}$;

момент инерции площади ГВЛ (или КВЛ) относительно продольной оси $I_{x1} = \frac{L_1 B_1^2}{L_0 B_0^2} I_{x0}$;

момент инерции площади ГВЛ относительно главной поперечной оси $I_{y1} = \frac{L_1^2 B_1}{L_0^2 B_0} I_{y0}$;

поперечный метацентрический радиус $r_1 = \frac{B_1^2 T_1}{B_0^2 T_0} r_0$;

продольный метацентрический радиус $R_1 = \frac{L_1^2 T_1}{L_0^2 T_0} R_0$ и т. д.

К недостаткам аффинного преобразования следует отнести обязательную неизменность всех коэффициентов полноты теоретического чертежа. Это позволяет использовать его только в том случае, когда при переходе от прототипа к проекту скорость судна V и число Фруда F_r изменяются незначительно.

Если для коэффициента общей полноты δ при изменении скорости v и числа Фруда F_r значение δ_1 проекта будет незначительно отличаться от значения δ_0 прототипа, то можно будет принять $\delta_1 = \delta_0$. В этом случае можно будет оставить и все прочие коэффициенты неизменными и перестроить чертеж аффинным способом. Изменяя $\frac{B}{T}$ и $\frac{H}{T}$, можно добиться нужной остойчивости, вместимости и т. д.

8.8. Выбор коэффициента продольной полноты

Коэффициент продольной полноты $\varphi = \frac{V}{L\omega} = \frac{\delta}{\beta}$ характеризует продольную остроту судна.

Для грузовых и грузопассажирских судов величину критического коэффициента продольной полноты, соответствующую критическим значениям относительной скорости в интервале чисел Фруда $Fr = 0,17 \div 0,27$, можно определить по формуле

$$\varphi_{кр} = 1,123 - 1,90Fr. \quad (8.1)$$

Критическая скорость соответствует критической точке на кривой сопротивления. А критической является точка, после которой медленно возрастающая кривая сопротивления начинает резко возрастать.

При переходе от критических соотношений к экономическим Вагенингенский бассейн (Голландия) предлагает снижать скорость, соответствующую равенству (1), на узел – для тихоходных и на 0,5 узла – для быстроходных грузовых судов.

Величину экономического коэффициента продольной полноты можно подсчитать по формуле Трооста $z_v = T \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{6} \frac{ST}{v} \right)$. Здесь, как и в дальнейшем, под Fr понимается число Фруда, соответствующее эксплуатационной скорости. Такие же величины коэффициента продольной полноты можно подсчитать по формуле Л.М. Ногида

$$\varphi_{эк} = \frac{0,320}{Fr^{0,5}} \quad (8.2)$$

для чисел Фруда в интервале $Fr = 0,17 \div 0,32$. При числах Фруда, меньших $Fr = 0,25$ и особенно меньших $Fr = 0,17$, Л.М. Ногид рекомендует формулу

$$\varphi_{эк} = 1,06 - 1,7Fr. \quad (8.3)$$

На основе опытов установлено, что при числах Фруда, больших 0,45, значения коэффициента продольной полноты, соответствующие

щие минимуму сопротивления, почти не зависят от относительной скорости и в очень небольшой степени зависят от $\frac{B}{T}$ и относительной длины l судна.

При форме обводов, характерной для современных быстроходных судов, оптимальные значения коэффициента продольной полноты лежат в пределах 0,63–0,65 в зависимости от относительной длины. При очень малых l значение φ падает до 0,61.

Таким образом, оказывается возможным выбирать коэффициент φ в указанных пределах, уточняя его с учетом других соображений, связанных с проектированием судна. В частности, следует иметь в виду, что при выбранном значении коэффициента δ снижение β и увеличение φ позволяет несколько уменьшить относительную длину судна без заметного роста сопротивления. Такое увеличение коэффициента φ позволяет несколько уменьшить относительную длину судна без заметного роста сопротивления. Такое увеличение коэффициента φ может оказаться также полезным в том случае, когда необходимо увеличить габариты отсеков в оконечностях судна. С другой стороны, уменьшение коэффициента φ приводит к более выгодным соотношениям на экономических ходах, что имеет существенное значение.

В интервале чисел Фруда $Fr = 0,30 \div 0,45$ оптимальное значение коэффициента продольной полноты быстро уменьшается со снижением относительной скорости хода. При числах Фруда порядка 0,30 оно падает приблизительно до $\varphi = 0,52$. При малых числах Фруда изменение коэффициента продольной полноты в пределах 0,48–0,63 (и выше при малых значениях отношения $\frac{B}{T}$) не вызывает существенного изменения сопротивления.

8.9. Выбор коэффициента полноты мидель-шпангоута

В соответствии с величиной относительной скорости (числом Фруда) суда подразделяются на три группы:

тихоходные $Fr = 0 \div 0,25$;

среднескоростные $Fr = 0,25 \div 0,35$;

быстроходные $Fr = 0,35 \div 0,55$ и выше.

При числах Фруда, соответствующих тихоходным судам, выгодно заострять оконечности, концентрируя водоизмещение в средней части судна, однако при чрезмерно полном мидель-шпангоуте трудно осуществить плавное сопряжение ватерлиний в районе их притыкания к цилиндрической вставке. Это ограничивает верхний предел общепринятых значений коэффициента полноты мидель-шпангоута.

При числах $F_r \leq 0,30$ средние значения коэффициента полноты мидель-шпангоута можно определить по формуле, предложенной В.В. Ашиком, в зависимости от коэффициента общей полноты:

$$\beta = 1,01\delta^{1/12}. \quad (8.4)$$

При числах Фруда $F_r \geq 0,30$ В.В. Ашик предлагает определять средние значения коэффициента полноты мидель-шпангоута в зависимости от коэффициента общей полноты по формуле

$$\beta = 1,03\delta. \quad (8.5)$$

Вообще на относительно тихоходных судах при числах Фруда ниже 0,25 коэффициент полноты мидель-шпангоута увеличивается примерно от 0,96 до 0,99, то есть близок к единице.

При проектировании быстроходных судов коэффициент β определяется принятыми значениями коэффициентов δ и φ . Практически коэффициенты полноты мидель-шпангоута судов, плавающих при числах Фруда 0,35–0,60, лежат в пределах $\beta = 0,75 \div 0,96$. На судах с булями они возрастают до $\beta = 1,010 \div 1,015$.

Обычно обвод мидель-шпангоута очерчивается двумя прямыми и другой окружности. Радиус закругления скулы транспортных судов не входят большей частью из пределов $(0,14 \div 0,35) \frac{B}{2}$. На современных грузовых и грузо-пассажирских судах днище в средней части делается либо без подъема, либо с небольшой килеватостью, равной $(0,01 \div 0,02) \frac{B}{2}$.

8.10. Выбор коэффициента общей полноты

При определении коэффициента общей полноты следует иметь в виду, что определенной форме судна соответствуют свои особенности на кривой полного сопротивления воды и, в частности, своя критическая скорость. Как отмечалось выше, этой скоростью принято называть такую скорость судна, начиная с которой кривая сопротивления, до того изменявшаяся полого, начинает изменяться круто. Чтобы по возможности предотвратить значительную потерю скорости хода судна в море в условиях действия волнения и ветра, эксплуатационную скорость судна следует назначать, как уже указывалось, на 0,5–1,0 узла менее его критической скорости. Особенно это относится к судам небольших и средних размеров с $L \leq 120$ м. На рис. 8.21 F_{r1} , F_{r2} , F_{r3} обозначают критические точки, после которых коэффициент сопротивления ξ начинает резко возрастает.

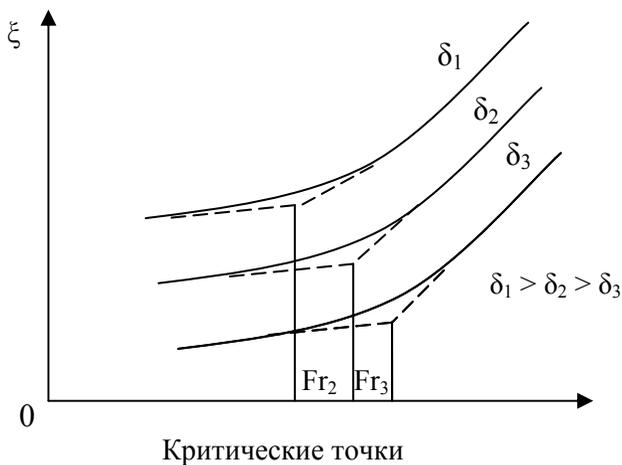


Рис. 8.21. Влияние чисел Фруда на коэффициент сопротивления ξ

Величина эксплуатационной скорости, как показывает опыт, зависит в сильной степени от числа Фруда и коэффициента общей полноты судна. Эта зависимость может быть проиллюстрирована рис. 8.22, на котором приведена зависимость коэффициента полного сопротивления ξ от коэффициента общей полноты δ и от числа Фруда, а скорость,

как известно, является функцией сопротивления. С увеличением коэффициента общей полноты δ критическая относительная скорость уменьшается, что приводит к более раннему повышению сопротивления для движущегося судна. Особенно сильно этот эффект проявляется у судов небольших и средних размеров с $L \leq 120$ м.

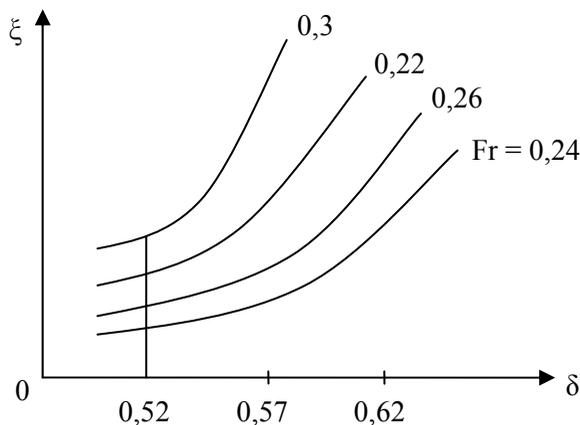


Рис. 8.22. Влияние коэффициента общей полноты δ на коэффициент сопротивления ξ

Учитывая сказанное, ряд авторов, обрабатывая данные серийных испытаний моделей судов, предложили приближенные формулы для определения коэффициента общей полноты тихоходных судов, полагая, что действительная скорость хода их не будет превосходить значения экономической скорости. Одной из наиболее популярных в этом отношении является формула Александра

$$\delta_{\text{эк}} = K - 1,68Fr, \quad (8.6)$$

где $K = 1,04 \div 1,06$ для эксплуатационной скорости;

$K = 1,06 \div 1,08$ для сдаточной скорости судна.

Меньшие значения коэффициента соответствуют относительным скоростям $0,16 - 0,20$; большие – относительным скоростям более $0,20$.

Формула (8.6) относится к одновинтовым судам. При использовании ее для двухвинтовых судов постоянная K увеличивается на $0,01$.

Эйр предложил рассматривать коэффициент K в формуле (8.6) как переменную величину, которая в зависимости от числа Фруда принимает следующие значения:

$$Fr - 0,150; 0,180; 0,210; 0,240; 0,270; 0,300;$$

$$K - 1,040; 1,045; 1,050; 1,060; 1,070; 1,080.$$

Обобщая опыт Гамбургского бассейна, Э. Хекшер рекомендует определять коэффициент общей полноты по формуле

$$\delta_{\text{ЭК}} = 1,0 - 1,44Fr. \quad (8.7)$$

Для учета влияния отношения длины судна к его ширине на экономическое значение коэффициента общей полноты Тельфер предложил пользоваться формулой

$$\delta_{\text{ЭК}} = 1,0 - 1,25 \left(\frac{B}{L} + 1 \right) Fr, \quad (8.8)$$

где $\frac{B}{L} = 6 \div 8$.

Если принять среднее значение $\frac{B}{L} = 7,0$, то формула Тельфера (8.8) приводит к формуле Хекшера (8.7).

Следует иметь в виду, что предельное значение коэффициента δ небольшого тихоходного судна (длиной не более 100–120 м) не рекомендуется выбирать более 0,77–0,78 при любом числе Фруда во избежание значительной потери им скорости на волнении.

У больших тихоходных судов с числом Фруда $Fr \leq 0,20 \div 0,22$, к которым принадлежат обычно наливные суда и рудовозы, величина коэффициента общей полноты выбирается, как правило, больше на 0,02–0,04 по сравнению с полученной по той или иной приближенной формуле.

При определении элементов пассажирских судов, в том числе и коэффициента общей полноты, решающее значение чаще полу-

чают требования, связанные с размещением помещений. Поэтому для увеличения габаритных размеров судна коэффициенту общей полноты, как правило, придают меньшее значение по сравнению с цифрой, вытекающей из анализа ходовых качеств судна.

По А. Линдбладу, для современных быстроходных пассажирских судов при $Fr > 0,29$ в среднем характерно соотношение

$$\delta = 1,085 - 1,68Fr. \quad (8.9)$$

Для судов с числом $Fr = 0,3 \div 0,6$ можно принять предложенную В.В. Ашиком формулу

$$\delta = \frac{0,43}{Fr^{1/4}}. \quad (8.10)$$

8.11. Выбор коэффициента полноты грузовой ватерлинии

Коэффициент полноты грузовой ватерлинии геометрически связан с коэффициентом общей полноты, коэффициентом полноты мидельшпангоута и другими характеристиками формы: например, углами заострения ватерлиний, формой шпангоутов и батоксов. Каждый из перечисленных факторов оказывает влияние на сопротивление воды движению судна, зависящее, в свою очередь, от относительной скорости и формы судна. Поэтому выбрать оптимальное значение коэффициента α с точки зрения ходкости судна затруднительно. Кроме того, при выборе коэффициента полноты грузовой ватерлинии необходимо учитывать также требования, связанные с остойчивостью судна и его поведением на волнении, а также требования непотопляемости, вместимость и т. д.

Пока еще нельзя предложить какие-либо практические приемы, позволяющие заранее назвать вполне обоснованное значение коэффициента полноты грузовой ватерлинии проектируемого судна и все важные обстоятельства дела в комплексе. Более обоснованно значение коэффициента α можно выбрать по данным подходящих прототипов и серийных испытаний моделей. Иногда окончательное значение устанавливается в процессе разработки теоретического чертежа.

Коэффициент полноты площади ватерлинии можно вычислить по формуле Лиделя

$$\alpha = a\varphi^{2/3}, \quad (8.11)$$

где практический коэффициент у Лиделя был $a = 1,0$.

Средний же коэффициент a в этой формуле, по В. Ашику, равен 0,985, а вообще он зависит от формы шпангоутов. Самая низшая его величина для резко выраженных u -образных шпангоутов равна 0,970, наивысшая для резко выраженных V -образных – 1,02.

Если при проектировании почему-либо нужно определить приближенно величину α , исходя из величины δ , то В. Ашик предлагает выразить ее так

$$\alpha \approx \delta^{1/2} \quad (8.12)$$

или

$$\alpha \approx \delta + 0,1. \quad (8.13)$$

Надводный объем судна зависит от α , что можно видеть из уравнения вместимости. Под вместимостью понимается объем корпуса, вычисленный по теоретическому чертежу по главную палубу. Принимая прямостенность бортов в районе грузовых трюмов, вместимость корпуса V_k можно определить по формуле

$$V_k = V + S(H - T) + \Delta V_n + \Delta V_k + \Delta V_{пб}, \quad (8.14)$$

где V – объем судна, m^3 ;

T – осадка судна с полным грузом, m ;

H – высота судна на миделе, m ;

S – площадь ГВЛ, m^2 ;

ΔV_n и ΔV_k – добавочные объемы корпуса за счет седловатости в носовой и кормовой частях;

$\Delta V_{пб}$ – добавочный объем корпуса за счет погиби бимсов, m^3 .

Пренебрегая отмеченными добавочными объемами, можно записать

$$V_k = V + S(H - T)$$

или

$$V_k = V + \left[1 + \frac{ST}{V} \left(\frac{H}{T} - 1 \right) \right] = \delta LBT \left[1 + \frac{\alpha}{\delta} \left(\frac{H}{T} - 1 \right) \right]. \quad (8.15)$$

Из (8.15) можно видеть, что увеличение α положительно влияет на вместимость корпуса, приводя к возрастанию вместимости за счет увеличения *надводного объема судна*.

Коэффициент α влияет также на коэффициент полноты корпуса на уровне верхней палубы, а следовательно, и на размещение на этой палубе судовых помещений, устройств и палубных механизмов.

8.12. Выбор относительной длины и отношения длины L к ширине судна B

Одной из основных безразмерных характеристик формы любого судна является его относительная длина $l = \frac{L}{V^{1/3}}$, где V – объемное водоизмещение, m^3 , или, что практически одно и то же $l = \frac{L}{D^{1/3}}$, где D – весовое водоизмещение, т.

После некоторого преобразования относительную длину судна можно представить в виде

$$l = \left(\frac{L}{B} \right)^{2/3} \left(\frac{B}{T} \right)^{1/3} \frac{1}{\delta^{1/3}}, \quad (8.16)$$

откуда следует, что основное влияние на величину относительной длины оказывает отношение $\frac{L}{B}$.

В свою очередь, после небольшого преобразования из выражения (8.16) можно получить величину отношения длины судна к его ширине в виде

$$\frac{L}{B} = l^{3/2} \frac{\delta^{1/2}}{\left(\frac{B}{T}\right)^{1/2}}, \quad (8.17)$$

откуда следует, что на отношение $\frac{L}{B}$ основное влияние оказывает относительная длина судна $l = \frac{L}{V^{1/3}}$. Поэтому обе рассматриваемые величины оказывают в основном одинаковое качественное влияние на различные свойства судна.

Кроме того, из выражений (8.16) и (8.17) также следует, что и относительная длина l и отношение $\frac{L}{B}$ зависят от отношения $\frac{B}{T}$, величина которого определяется из условия обеспеченности остойчивости, и от коэффициента общей полноты δ , причем зависимость относительной длины l и отношения $\frac{L}{B}$ от отношения $\frac{B}{T}$ и коэффициента δ различна.

Следовательно, при выборе относительной длины (или отношения $\frac{L}{B}$) необходимо учитывать не только ходовые качества судна, но и его остойчивость, а также весовые соотношения и экономические показатели. Кроме того, необходим некоторый минимум длины для обеспечения заданной грузо- или пассажировместности, а на военных судах – для надлежащего размещения вооружения. Длина судна определяется и из условия удифферентовки или ограничения осадок, а для малых судов выбор относительной длины связан в значительной мере с вопросами остойчивости. Когда минимальная длина намечена, то стремятся ее не увеличивать, если нельзя существенно уменьшить водоизмещение и мощность механизмов, так как увеличение длины приводит к увеличению стоимости постройки и эксплуатации, ухудшению поворотливости, увеличению силуэта, а следовательно, увеличению парусности и уязвимости.

Учитывая ходовые качества судна, следует иметь в виду, что с увеличением относительной длины сопротивление трения мед-

ленно возрастает, а остаточное сопротивление уменьшается, причем тем интенсивнее, чем больше относительная скорость.

В силу этого полное сопротивление быстроходных судов сравнительно резко уменьшается с увеличением относительной длины. Кривые же сопротивления тихоходных и отчасти среднескоростных судов, построенные в функции относительной длины или отношения $\frac{L}{B}$, имеют минимум. Общепринятые значения относительной

длины и отношения $\frac{L}{B}$ тихоходных и среднескоростных судов располагаются либо в районе минимума сопротивления, либо на относительно пологих участках кривой сопротивления $R = f\left(\frac{L}{B}\right)$.

Исследованиями также установлено, что при одних и тех же значениях относительной длины l или отношения $\frac{L}{B}$ при уменьшении коэффициента продольной полноты или коэффициента общей полноты полное сопротивление уменьшается (рис. 8.23).

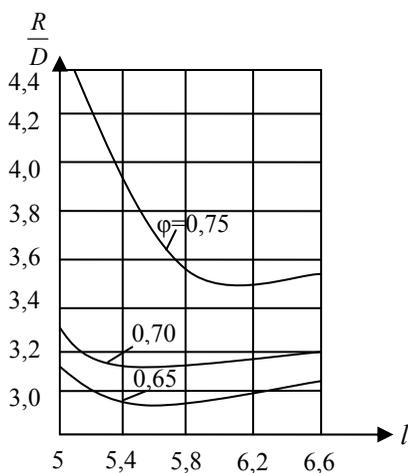


Рис. 8.23. Зависимость отношения $\frac{R}{D}$ от относительной длины l при различных значениях коэффициента продольной полноты ϕ

Для определения относительной длины гражданских судов можно воспользоваться формулой В. Позднюнина, которая получила в свое время широкое распространение в научных кругах в СССР и за границей:

$$l = c \left(\frac{v}{2 + v} \right)^2, \quad (8.18)$$

где v – эксплуатационная скорость в узлах;

c – коэффициент в среднем равный 7,65, величина которого подвержена значительным колебаниям: например, $c = 7,30$ – для одновинтовых грузовых и грузопассажирских судов при $v = 11,0 \div 16,5$ узла; $c = 7,45$ – для двухвинтовых судов при $v = 15,0 \div 18,5$ узла; $c = 7,98$ – для крупных пассажирских судов при $v > 20$ узлов.

Относительная длина может быть подсчитана и по формуле Л. Ногида $l = 2,33v^{1/3}$, которая применима для транспортных судов дальнего плавания со скоростью выше 10 узлов и коэффициент, который тоже колеблется в некоторых пределах.

В.В. Ашик, Б.А. Царев, И.В. Челпанов для вычисления относительной длины современных судов в широком диапазоне скоростей рекомендуют воспользоваться формулой $l = (1,36 \pm 0,2)v^{1/2}$.

Характерные значения l и $\frac{L}{B}$ для различных судов колеблются в следующих пределах [10]:

	l	$\frac{L}{B}$
Эскадренные миноносцы	8,0–9,0	9,5–10,0
Крейсеры	7,5–8,5	9,0–10,0
Авианосцы	7,4–7,6	7,6–7,9
Пассажирские суда	6,0–7,5	7,0–8,0
Грузовые суда	5,0–6,0	6,5–7,5
Малые каботажные суда	4,5–5,0	5,0–6,0.

Отношение $\frac{L}{B}$ в основном влияет на ходкость, устойчивость на курсе, остойчивость, продольную прочность, эксплуатационные удобства.

При заданных $\delta, l, \frac{B}{T}$ отношение $\frac{L}{B}$ находится из выражения

$$\frac{L}{B} = \sqrt{l^3 \delta \frac{T}{B}}. \quad (8.19)$$

Влияние $\frac{L}{B}$ на продольную прочность корпуса при заданных D, H, δ обусловлено тем, что при изменении $\frac{L}{B}$ одновременно изменяется и $\frac{L}{H}$. При относительно низком значении $\frac{L}{H} = 10 \div 13$ (например, у буксиров-толкачей) изменение $\frac{L}{B}$ влияет на общую продольную прочность незначительно. При больших значениях $\frac{L}{H}$ (например, у танкеров $\frac{L}{H} = 26 \div 34$), увеличение $\frac{L}{B}$ отрицательно сказывается на общей продольной прочности судна.

Характерные значения $\frac{L}{B}$ для различных судов внутреннего плавания приведены в табл. 8.5.

Основные геометрические характеристики типовых судов

Типы судов	Класс	Соотношение главных размеров						Коэффициенты полноты		
		L/B	B/T	H/T	L/H	B/H	δ	β	α	
	Л	до 6,8 ²	6,8–10,3	1,9–2,9	16,4–18,5	–	0,54–0,68	0,85–0,99	0,83–0,87	
			до 13,3 ³	до 4,3 ³	25,3–28,2 ³	–	0,74–0,80 ³			
		5,4–5,8	4,0–7,5	1,6–2,0	17,7–22,0	2,7–3,7	0,54–0,74	0,78–0,97	0,73–0,86	
Пассажирские и грузопасса- жирские	Р		до 11,6 ³	до 3,5 ⁵			до 0,40 ⁵			
				до 4,3 ³						
		7,1–9,4	4,0–6,8	1,7–2,3	16,3–24,6	2,4–3,1	0,46–0,78	0,84–0,995	0,73–0,86	
	О	до 5,9 ⁵			до 11,7 ⁵	до 2,0 ⁵				
		–	4,0–6,8	–	–	–	–	–	–	
		6,2–7,3	5,8–9,9 ⁴	–	14,4–21,4 ³	3,7–4,7	0,79–0,85	от 0,98	0,88–0,92	
	Л	4,3–4,8 ³								
		6,1–7,3	5,1–7,3	1,6–2,2	17,8–23,2	2,6–3,2	0,81–0,85	от 0,99	0,84–0,89	
		5,4–5,8 ³			24,8–27,5 ³	3,7–4,7 ³	до 0,76 ⁹		до 0,91	
Сухогрузные	О	6,7–8,2	4,6–6,7	1,5–1,7	18,8–25,8	2,5–3,3	0,77–0,86	от 0,995	0,87–0,93	
		5,3–6,4 ⁶	до 8,8 ⁶	до 1,3 ⁶	28,6–31,8 ⁶	до 3,8 ⁸				
		6,5–8,5	3,4–5,7	1,7–2,0	16,7–20,0	2,4–3,1	0,76–0,82	от 0,99	0,82–0,89	
				до 2,3 ⁷						
						до 3,3 ⁸				

Типы судов	Класс	Соотношение главных размеров						Коэффициенты полноты		
		L/B	B/T	H/T	L/H	B/H	δ	β	α	
Танкеры	Л	4,4–5,0 ³	до 8,0 ³	до 1,7 ³	до 20,4 ³	–	0,81–0,84	от 0,99	0,89–0,93	
	Р	5,2–6,8	6,3–7,0	1,3–1,9	19,5–34,0	4,7–5,0	0,81–0,84	от 0,99	0,89–0,93	
	О	6,7–8,2	3,7–5,2	1,2–1,7	22,2–25,8	2,7–3,8	0,80–0,87	от 0,92	0,88–0,90	
	М ¹	7,2–7,8	4,0–4,7	1,2–1,6	20,9–26,0	–	0,79–0,85	от 0,99	0,86–0,90	
Букиры, толчки	Р	3,7–4,5	4,1–6,5	1,6–1,9	12,3–16,2	3,6–4,0	0,53–0,60	0,82–0,99	0,76–0,92	
	–	–	–	–	–	2,7–2,8 ²	–	–	–	
	О	3,7–4,7	3,7–4,4	1,4–1,7	11,0–12,0	2,5–2,6	0,51–0,67	0,85–0,995	0,78–0,91	

Приложение.

- ¹ Включая суда морского прибрежного плавания.
- ² Суда для мелководных рек.
- ³ Мелкосидящие суда с водометными движителями.
- ⁴ Верхний предел значений B/T для мелкосидящих судов с водометными движителями.
- ⁵ Малотоннажные суда.
- ⁶ Суда-площадки.
- ⁷ Хлопководы.
- ⁸ Отдельные суда.
- ⁹ Быстроходные суда.

8.13. Обоснование выбора отношения $\frac{B}{T}$

Отношение размерений $\frac{B}{T}$ влияет на сопротивление воды, начальную остойчивость и управляемость судна. Значения $\frac{B}{T}$ для основных судов ВВТ приведены в табл. 8.5.

Если при заданном водоизмещении $V = \text{const}$ с увеличением $\frac{B}{T}$ значение $l = \text{const}$, то в этом случае остаточное сопротивление R_0 возрастает либо за счет роста коэффициента общей полноты δ , либо за счет снижения $\frac{L}{B}$, что следует из анализа формулы

$$l = \left[\frac{1}{\delta} \left(\frac{B}{T} \right) \left(\frac{L}{B} \right)^2 \right]^{1/3}. \quad (8.20)$$

Как правило, уменьшение отношения $\frac{L}{B}$ притупляет носовую часть, что приводит к росту R_0 остаточного сопротивления.

При неизменных значениях $D = \text{const}$, $\delta = \text{const}$, $\frac{L}{B} = \text{const}$ с увеличением $\frac{B}{T}$ отмечается снижение остаточного сопротивления R_0 за счет роста относительной длины l и снижения относительной скорости – чисел Фруда.

Влияние $\frac{B}{T}$ на начальную остойчивость видно из уравнения начальной остойчивости

$$h_0 = r_0 + z_c - z_g. \quad (8.21)$$

При наличии ТЧ значения метацентрического радиуса r_0 и аппликаты ЦВ z_c определяются по кривым плавучести и остойчивости в зависимости от осадки.

На стадии проектирования z_c и r_0 определяются аналитическими методами, а z_g – с помощью статистических данных. Из ТК известно, что метacentрический радиус r_0 определяется по формуле

$$r_0 = \frac{J_0 x_0}{V}, \quad (8.22)$$

где V – объемное водоизмещение;

$J_0 x_0$ – момент инерции площади ГВЛ относительно продольной оси, проходящей через ее центр тяжести.

Принимая приближенно $J_0 x_0 = KLB^3$ и $V = \delta LDT$, получим, что

$$r_0 = \frac{KLB^3}{\delta LBT} = A_1 \frac{B^2}{T}, \quad (8.23)$$

$$A_1 = \frac{K}{\delta},$$

где по А. Фан-дер-Флиту $K = \frac{\alpha^2}{11,4}$;

по В. Поздюнину $K = \frac{\alpha^2 K^2}{12}$.

Тогда $A_1 = \frac{\alpha^2}{11,4\delta}$ (по Фан-дер-Флиту),

$A_1 = \frac{\alpha^2}{12\delta}$ (по В. Поздюнину).

Аппликата центра величины

$$z_c = A_2 T,$$

где $A_2 = \frac{1}{1} \left(\frac{\alpha}{\delta} \right)^{1/2}$.

Аппликата центра тяжести

$$z_g = \zeta H.$$

Тогда

$$h_0 = A_1 \frac{B^2}{T} + A_2 T - z_g. \quad (8.24)$$

Наиболее рациональным путем определения величины $\frac{B}{T}$ является уравнение остойчивости.

Если значение h_0 задано в исходных данных, тогда из уравнения (8.24) следует

$$B = \sqrt{(h_0 + z_g - A_2 T) \frac{T}{A_1}}. \quad (8.25)$$

Если полученное из уравнения (8.25) отношение $\frac{B}{T}$ выходит за пределы значений, допустимых для проектируемого типа судна, необходимо провести уточнение расчетов по определению ширины судна.

При известной ширине B проектируемого судна сразу можно определить отношение $\frac{B}{T}$, обеспечивающее требуемую начальную остойчивость.

Характерные значения отношения $\frac{B}{T}$ для различных судов приведены в табл. 8.5.

8.14. Положение наиболее полного шпангоута и центра величины по длине судна

На судах со скоростями, соответствующими числам Фруда ($Fr < 0,30 \div 0,32$), наиболее полный шпангоут, как правило, распола-

гается посредине длины судна; по мере увеличения относительной скорости его выгодно смещать в корму.

Наиболее полный шпангоут на быстроходных военных судах (миноносцах) смещается в корму на расстояние до 5 % от середины длины судна.

Абсцисса ЦВ x_c , измеренная в долях длины судна (наряду с положением наиболее полного шпангоута и цилиндрической вставки), характеризует в значительной мере распределение водоизмещения по длине судна. Поэтому при фиксированном значении коэффициента продольной полноты абсцисса ЦВ оказывает заметное влияние на сопротивление воды движению судна, особенно тихоходного и среднескоростного.

Смещение ЦВ в нос приводит к увеличению волнового сопротивления, но уменьшает сопротивление формы. Смещение ЦВ в корму приводит к обратному результату. В каждом частном случае минимум сопротивления соответствует определенному положению ЦВ по длине судна.

Оптимальное положение ЦВ в первую очередь зависит от относительной скорости и коэффициента продольной полноты. Имеют также значение соотношения главных размерений и другие характеристики формы судна.

При подходящих соотношениях между коэффициентами полноты и относительной скоростью судна можно смещать ЦВ от его оптимального положения в некоторых пределах, не опасаясь значительного возрастания сопротивления, и это облегчает выбор абсциссы ЦВ.

Л.М. Ногид установил некоторые пределы оптимального положения ЦВ в функции коэффициента φ и δ : при значениях коэффициентов $\varphi = \delta = 0,80x_c$ смещается в нос примерно на 1,8 %; при значениях $\varphi = \delta = 10,55x_c$ смещается в корму примерно на 2,5 %. Согласно этим данным x_c располагается посередине длины судна при $\varphi \approx 0,69$ и при $\varphi \approx 0,72$.

Для определения оптимального значения абсциссы ЦВ в процентах от длины судна между перпендикулярами можно воспользоваться формулой Трооста $x_c = 17,5\varphi - 12,5$, которая приводит примерно к тем же результатам.

Для судов ВВТ А.Б. Карпов предложил зависимость

$$x_c = 0,03L\sqrt[3]{\varphi - 0,675}. \quad (8.26)$$

Для морских транспортных судов используется зависимость

$$x_c = 0,12l(\delta - 0,63) \pm 0,01. \quad (8.27)$$

Кривые $R = f\left(\frac{x_c}{L}\right)$ пологи в районе минимума, поэтому отступление от оптимальных значений $\frac{x_c}{L}$ на 0,5–0,8 % L практически не влияет на сопротивление движения судна.

8.15. Обводы носовой и кормовой оконечностей

Форма строевой по шпангоутам, отражающая форму судовой поверхности, оказывает существенное влияние на сопротивление воды движению судна.

Различают три типичные строевые по шпангоутам в пределах носового заострения

$$l_n = \frac{L_{ц.н.}}{L} = 0,5 - 10,4Fr^2, \quad (8.28)$$

где $L_{ц.н.}$ и l_n – абсолютная и относительная длина цилиндрической вставки в носовой части судна (рис. 8.24).

Кривые, имеющие одинаковый коэффициент продольной полноты, характеризуют форму так называемых прямых 1, вогнутых 3 и слегка вогнутых 2 строевых.

Прямые носовые ветви строевых по шпангоутам характерны для тихоходных судов со скоростями, не превышающими числа Фруда около $Fr = 0,21 \div 0,22$. При $Fr = 0,22 \div 0,28$ строевые по шпангоутам получают с незначительной вогнутостью, а при числах Фруда, соответствующих быстроходным судам, применяют прямые строевые или строевые с очень легкой вогнутостью.

Аналогично строевым по шпангоутам различают ватерлинии выпуклые, прямые и умеренно вогнутые. Применение вогнутых грузовых ватерлиний позволяет заострить обводы судна в зоне повышенных давлений, соответствующей району расположения носовой корабельной волны, чем уменьшается сопротивление воды движению судна.

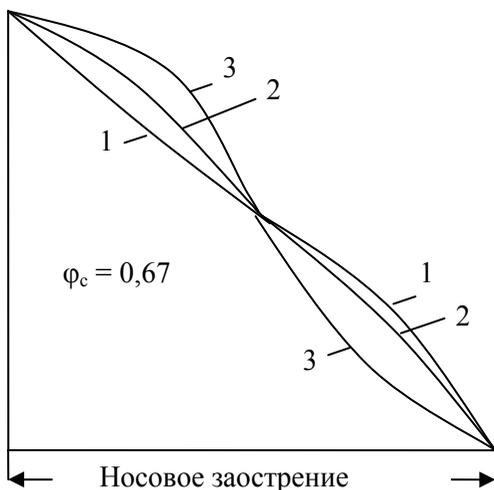


Рис. 8.24. Типичные строевые по шпангоутам в области носового заострения

При увеличении относительной скорости растет длина носовой волны, поэтому на более быстроходных судах для получения благоприятного эффекта нужно смещать точку перегиба ватерлинии ближе к миделю.

При больших относительных скоростях для снижения сопротивления нужно заострять грузовую ватерлинию по всей длине носового заострения, то есть переходить от вогнутых ватерлиний к прямым.

На очень полных судах заострить грузовую ватерлинию трудно: у таких судов относительная скорость небольшая, волновое сопротивление невелико, и поэтому по возможности нужно применять выпуклые грузовые ватерлинии, близкие к прямым.

С точки зрения сопротивления воды движению судна форма носовых ветвей грузовых ватерлиний соответствует примерно следующим числам Фруда:

- $Fr < 0,16$ – выпуклые;
- $Fr = 0,16 \div 0,19$ – прямые или слегка выпуклые;
- $Fr = 0,19 \div 0,22$ – вогнутые или прямые;
- $Fr = 0,22 \div 0,32$ – умеренно вогнутые;
- $Fr > 0,32$ – прямые.

Вогнутые ватерлинии в сочетании с каплеобразными шпангоутами применяются и при более высоких относительных скоростях – вплоть до чисел Фруда $Fr = 0,36$.

Форма грузовой ватерлинии в сильной степени зависит от угла, под которым она подходит к диаметральной плоскости. Значения этого угла, соответствующие минимуму сопротивления, зависят как от относительной скорости судна, так и от положения ЦВ по длине судна x_c , отношения длины к ширине судна $\frac{L}{B}$ и от ряда других факторов.

На полных тихоходных судах угол заострения грузовой ватерлинии в носовой оконечности ψ_n , отсчитанный на один борт, достигает $32\text{--}33^\circ$ и более. Уменьшаясь с увеличением относительной скорости судна, он падает до $6\text{--}8^\circ$ при числах Фруда около $Fr = 0,30\div 0,32$. При дальнейшем увеличении относительной скорости оптимальные значения угла заострения грузовой ватерлинии несколько увеличиваются, примерно до $9\text{--}10^\circ$.

Оптимальные значения угла заострения ψ_n выражают обычно в функции числа Фруда или коэффициента общей или продольной полноты носовой половины судна. Примером такой зависимости может быть формула Трооста

$$\psi_n = 69,5 - 260\varphi_n(1 - \varphi_n). \quad (8.29)$$

Для промысловых мелких судов с отношением $\frac{L}{B} = 3,5\div 4,5$ (у транспортных судов оно около 7) увеличение угла притыкания (заострения) сверх $\psi_n = 19\div 20^\circ$ невыгодно с точки зрения ходкости, как на тихой воде, так и на волнении, а при больших $\frac{L}{B}$ он не должен превышать $15\text{--}17^\circ$.

Минимально допустимой величиной угла притыкания грузовой ватерлинии к диаметральной плоскости является 8° . Дальнейшее уменьшение этого угла недопустимо по технологическим причинам и соображениям прочности носовой оконечности в районе форштевня при несимметричной загрузке на волнении.

Обычно различают четыре типа формы поперечных сечений судна (четыре типа формы шпангоутов): *V*-образный, умеренно *V*-образный, умеренно *U*-образный и *U*-образный (рис. 8.25).

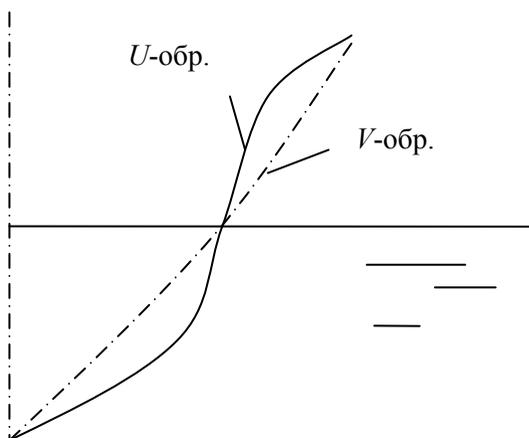


Рис. 8.25. Основные типы шпангоутов, используемых в поперечных сечениях судна

Форма шпангоута в значительной степени предопределяется формой строевой по шпангоутам и грузовой ватерлинии. В носовой оконечности *V*-образные шпангоуты хорошо согласуются с выпуклыми и прямыми ватерлиниями, *U*-образные шпангоуты – с вогнутыми ватерлиниями.

Шпангоуты в носовой оконечности должны иметь достаточный развал в надводной части для уменьшения заливаемости, который должен начинаться не слишком близко от грузовой ватерлинии с тем, чтобы на волнении при погружении носовой оконечности в воду действующая ватерлиния имела бы достаточную остроту.

На современных судах форштевень в надводной части обычно делают наклонным под углом α_n до $15\text{--}30^\circ$ (рис. 8.26). Наклонный форштевень позволяет заострить ватерлинии выше грузовой ватерлинии, что несколько уменьшает бурун в носовой оконечности и оказывает благоприятное влияние на килевую качку.

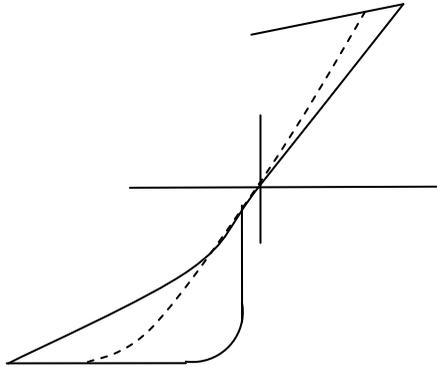


Рис. 8.26. Форма фрштевеня в надводной и подводной частях судна

Наклонный фрштевень повышает безопасность плавания, так как при столкновении судов пробоина от удара наклонным фрштевнем будет выше, чем при ударе вертикальным.

9. БАЛЛАСТИРОВКА И УДИФФЕРЕНТОВКА СУДНА. ВЫСОТА НАДВОДНОГО БОРТА

9.1. Определение необходимого количества балласта

При ходе судна порожнем с целью заглубления винтов и исключения отрицательного воздействия слеминга возникает необходимость принять балласт.

Расчет необходимого количества балласта при движении судна порожнем производится с учетом требований посадки судна в балластном пробеге. Осадка носом должна быть принята из диапазона $T_{\text{н}}^{\text{б}} = (0,01 \div 0,03)L$; осадка кормой – $T_{\text{к}}^{\text{б}} = (0,8 \div 1,1)D_{\text{в}}$, где $D_{\text{в}}$ – диаметр винта, м. Диаметр винта на данном этапе проектирования можно принять $D_{\text{в}} = 0,8T$ для одновинтового и $D_{\text{в}} = 0,65T$ – для двухвинтового судна (T – расчетная осадка). Средняя осадка в балластном переходе определяется по формуле

$$T^{\text{б}} = \frac{T_{\text{н}}^{\text{б}} + T_{\text{к}}^{\text{б}}}{2}. \quad (9.1)$$

Водоизмещение в балластном пробеге $D_6 = \rho V_6$ находим по гидростатическим кривым (см. рис. 8.20) в зависимости от T^6 . Тогда необходимое количество балласта m_6

$$m_6 = D_6 - D_{\text{пор}}, \text{ т.} \quad (9.2)$$

После этого балласт следует разместить в отсеках, для него предназначенных. Это могут быть двойные борты, двойное дно, форпик, объем которых определяется с учетом эпюры емкости. С учетом размещенного балласта рассчитывается центр тяжести судна в балластном переходе. Расчет ведется в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Расчет нагрузки и положения ЦТ судна в балластном пробеге с полными запасами

№ п/п	Наименование разделов	Масса m_i , т	Плечи, м		Моменты, тм	
			x_i	z_i	$m_i x_i$	$m_i z_i$
1	Корпус оборудованный	$m_{\text{ко}}$	x_1	z_1	$m_{\text{ко}}x_1$	$m_{\text{ко}}z_1$
2	Механизмы	$m_{\text{м}}$	x_2	z_2	$m_{\text{м}}x_2$	$m_{\text{м}}z_2$
3	Запас водоизмещения	$m_{\text{зв}}$	$x_3 = 0$	$z_3 = H$	$m_{\text{зв}}x_3$	$m_{\text{зв}}z_3$
	ВОДОИЗМЕЩЕНИЕ ПОРОЖНЕМ	$\sum_{i=1}^3 m_i$	—	—	$\sum_{i=1}^3 m_i x_i$	$\sum_{i=1}^3 m_i z_i$
4	Экипаж с багажом	$m_3 = m_4$	x_{54}	z_4	$m_4 x_4$	$m_4 z_4$
5	Провизия	$m_{\text{пр}} = m_5$	x_5	z_5	$m_5 x_5$	$m_5 z_5$
6	Пресная вода	$m_{\text{в}} = m_6$	x_6	z_6	$m_6 x_6$	$m_6 z_6$
7	Груз перевозимый	$m_{\text{т}} = m_7$	x_7	z_7	$m_7 x_7$	$m_7 z_7$
8	Топливо, масло, питательная вода	$m_{\text{ст}} = m_8$	x_8	z_8	$m_8 x_8$	$m_8 z_8$
9	Балласт в отсеках	δ_1	x_9	z_9	$m_{\delta_1} x_9$	$m_{\delta_1} z_9$
		δ_2	x_{10}	z_{10}	$m_{\delta_2} x_{10}$	$m_{\delta_2} z_{10}$
	ДЕДВЕЙТ	$\sum_{i=4}^9 m_i$	—	—	$\sum_{i=4}^9 m_i x_i$	$\sum_{i=4}^9 m_i z_i$
	ВОДОИЗМЕЩЕНИЕ В ГРУЗУ	$\sum_{i=1}^9 m_i$	x_g^6	z_g^6	$\sum_{i=1}^9 m_i x_i$	$\sum_{i=1}^9 m_i z_i$

Координаты ЦТ судна в балластном пробеге с полными запасами:

$$x_9^\delta = \frac{\sum_{i=1}^9 m_i x_i}{\sum_{i=1}^9 m_i}; \quad z_9^\delta = \frac{\sum_{i=1}^9 m_i z_i}{\sum_{i=1}^9 m_i}. \quad (9.3)$$

9.2. Расчет посадки судна

В курсовом проекте посадку судна следует определить как минимум для двух случаев состояния нагрузки судна:

судно в полном грузу и с полными запасами;

судно в балластном пробеге с полными запасами.

Расчет посадки судна выполняется на базе последней нагрузки масс и кривых элементов теоретического чертежа. Расчет удобно вести в табл. 9.2.

Полученные по теоретическому чертежу значения h , x_c полезно сравнить с полученными ранее при проектировании судна и сделать заключение.

Таблица 9.2

Расчет остойчивости, осадок и дифферента

№ п/п	Элементы плавучести и начальной остойчивости	Обозначения и формула	Размерность	Виды водоизмещения		Примечания
				в грузу	в балласте	
1	2	3	4	5	6	7
1	Водоизмещение	D	т			из расчета нагрузки
2	Возвышение ЦТ над основной	z_g	м			—"/—
3	Возвышение ЦВ над основной	z_c	м			по гидростат. кривым
4	Малый метацентрический радиус	r	м			—"/—
5	Малая метацентрическая высота	$h = r + z_c - z_g$	м			

1	2	3	4	5	6	7
6	Абсцисса ЦТ судна	x_g	М			из расчета нагрузки
7	Абсцисса ЦВ судна	x_c	М			по гидростат. кривым
8	Дифференцирующий момент	$M_g = D(x_g - x)$	Т·М			
9	Большой метацентрический радиус	R	М			по гидростат. кривым
10	Большая метацентрическая высота	$H = R + z_c - z_g$	М			
11	Абсцисса ЦТ площади ВЛ	x_f	М			по гидростат. кривым
12	Средняя осадка судна	T	М			—''—
13	Угол дифферента	$\psi = \frac{x_c - x_g}{H}$	Рад			$\psi^0 = \frac{x_g - x_c}{H} \times 57,3$
14	Осадка носом	$T_n = T_{cp} + \left(\frac{L}{2} - x_f\right)\psi$				
15	Осадка кормой	$T_k = T_{cp} - \left(\frac{L}{2} + x_f\right)\psi$	М			
16	Дифферент	$T_n - T_k$	М			
17	Момент, дифференцирующий на 1 см	$\frac{DH_m}{100L}$	$\frac{ТМ}{СМ}$			
18	Площадь ВЛ	S	М ²			
19	Число тонн на 1 см осадки	$q = \frac{\rho S}{100}$	$\frac{Т}{СМ}$			

9.3. Удифферентовка судна

Удифферентовать судно в полном грузу – это значит так распределить всю нагрузку судна по его длине, чтобы ЦТ судна совпал с принятым положением ЦВ. Как правило, в полном грузу судно должно плавать без дифферента. Исключения встречаются у судов некоторых назначений, например, промысловых. При неполной нагрузке грузовые суда должны плавать с дифферентом на корму. По-

ложение ЦТ судна определяется в процессе составления таблицы весовой нагрузки.

При составлении нагрузки судна положение ЦТ отдельных составляющих весов в начальной стадии проектирования принимается по схематическому эскизу общего расположения. Положение ЦВ определяется в процессе составления теоретического чертежа.

Таким образом, задача удифферентовки судна сводится к такому распределению грузов, входящих в нагрузку, при котором положение его ЦТ совпадает с выбранным в соответствии с требованиями гидромеханики положением ЦВ.

Итак, если имеется неравенство $x_c \neq x_g$, то для удифферентовки судна необходимо переместить либо ЦТ в сторону ЦВ, либо ЦВ в сторону ЦТ (рис. 9.1).

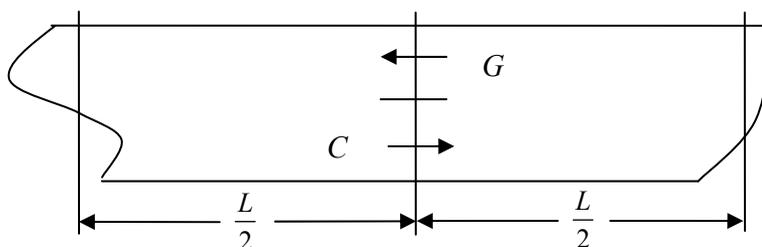


Рис. 9.1. Схема удифферентовки путем совмещения абсцисс ЦТ и ЦВ

Первое достигается перемещением грузов, а второе – изменением теоретического чертежа (изменением намеченной ранее длины судна): это два основных способа для удифферентовки судна. В качестве разновидности первого способа можно назвать удифферентовку путем изменения архитектурного типа судна. Удифферентовка перемещением грузов – наиболее распространенный прием. Широко используется перемещение топлива, различных перевозимых грузов, даже машинных отделений.

Предположим, удифферентовка производится путем перемещения грузов разного удельного веса, равных по объему: например, машинного отделения и грузового трюма (рис. 9.2).

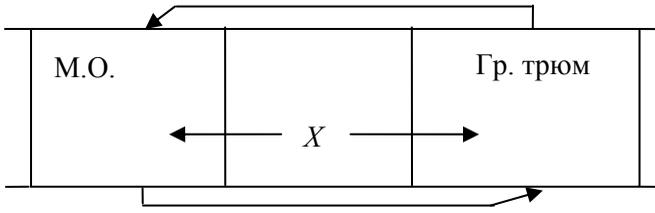


Рис. 9.2. Схема удифферентовки путем перемещения грузов разного удельного веса в горизонтальном направлении

Если $\frac{P_{\text{МХ}}}{V} = \gamma_{\text{МХ}}$ – удельный вес машинного отделения,

а $\frac{P_{\text{Гр. отсека}}}{V} = \gamma_{\text{Гр}}$ – удельный вес грузового отсека, то момент Q от перемещения грузов будет определяться выражением

$$Q = V\gamma_{\text{МХ}}x - V\gamma_{\text{Гр}}x = Vx(\gamma_{\text{МХ}} - \gamma_{\text{Гр}}).$$

При $\gamma_{\text{Гр}} > \gamma_{\text{МХ}}$ получаем $Q < 0$ – следовательно, ЦТ смещается в корму.

В общем виде удифферентовка, связанная с перемещением грузов, может быть представлена следующим образом. Предположим, уравнение моментов, соответствующее проверочному расчету удифферентовки, который производится в табличной форме, будет иметь вид

$$Dx_{go} = P_1x_1 + P_2x_2 + \dots + P_{n-1}x_{n-1} + P_nx_n,$$

причем в общем случае x_{go} не равно абсциссе ЦВ x_c . В соответствии с этим требуется переместить некоторые грузы (например, P_1 и P_2) таким образом, чтобы абсцисса x_{go} оказалась равной x_c . Для этого необходимо удовлетворить уравнению моментов

$$Dx_c = P_1(x_1 + \Delta x_1) + P_2(x_2 + \Delta x_2) + \dots + P_{n-1}x_{n-1} + P_nx_n.$$

Иначе говоря, необходимо выбрать Δx_1 и Δx_2 , чтобы было обеспечено равенство

$$\Delta x = x_c - x_{go} = \frac{P_1 \Delta x_1 + P_2 \Delta x_2}{D}$$

или в общем виде

$$\Delta x = \frac{\sum P_i \Delta x_i}{D}. \quad (9.4)$$

Предположим, что удифферентовка грузового судна осуществляется путем перемещения в нос машинного отделения, а также связанной с ним надстройки и топливного бункера, расположенного в машинном отделении. Перемещение машинного отделения вызовет, кроме того, уменьшение длины носового грузового трюма при таком же удлинении кормового трюма. Поэтому часть перевозимого груза переместится из носового трюма в кормовой на расстоянии l_m , равное длине машинного отделения (рис. 9.3).

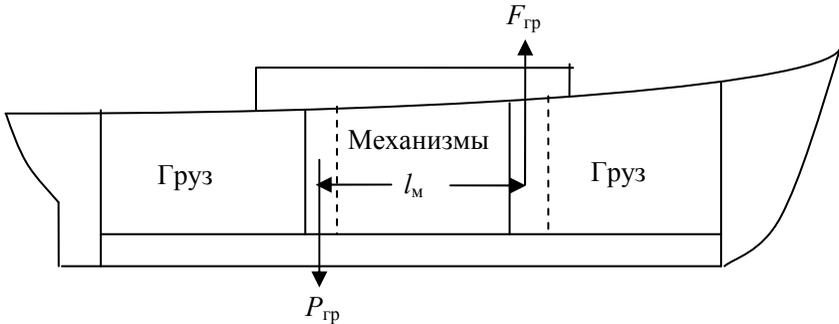


Рис. 9.3. Схема удифферентовки путем смещения МО в носовую часть судна

Предположим вначале, что машинное отделение передвинуто на 1 м. В этом случае вес перемещаемого перевозимого груза найдется по формуле

$$P_{гр} = \frac{K}{\mu} B(H - h_d), \quad (9.5)$$

где K – отношение площади поперечного сечения трюма (которая фактически может быть использована для перевозки груза) к произведению $B(H - h_d)$;

μ – коэффициент удельной вместимости.

Если P_m, P_n, P_t – вес перемещаемого оборудования машинного отделения, надстройки и топлива в пределах машинного отделения, то тогда в соответствии с формулой (9.1) каждое в отдельности перемещение этих грузов на 1 м изменит абсциссу ЦТ судна на величину

$$(\Delta x)_{1м} = \frac{P_m}{D}, \quad \Delta x_n = \frac{P_n}{D}, \quad \Delta x_t = \frac{P_t}{D}. \quad (9.6)$$

Перемещение же груза $P_{гр}$ на расстояние l_m изменит абсциссу ЦТ судна на величину $\Delta x_{гр} = \frac{P_{гр} l_m}{D}$. Следовательно, при перемещении машинного отделения в нос на 1 м суммарное изменение абсциссы ЦТ судна выразится формулой

$$(\Delta x)_{1м} = \frac{P_m + P_n + P_t - P_{гр} l_m}{D}. \quad (9.7)$$

С учетом изложенного, для того чтобы абсцисса ЦТ судна изменилась на заданную величину Δx , необходимо сместить переборки машинного отделения на величину

$$\Delta l = \frac{\Delta x}{(\Delta x)_{1м}}. \quad (9.8)$$

Если произведение $P_{гр} l_m$ будет мало отличаться от суммы $P_m + P_n + P_t$, то $(\Delta x)_{1м} \approx 0$ и такой способ удифферентовки непригоден. В этом случае лучше изменить длину судна и расположение переборок таранного отсека и ахтерпика.

Увеличим длину носовой и кормовой половин корпуса судна на величину $\frac{\Delta L}{2}$, которая мала по сравнению с длиной судна, а потому

не окажет существенного влияния на положение ЦТ и ЦВ, с которыми, следовательно, не стоит считаться (рис. 9.4).

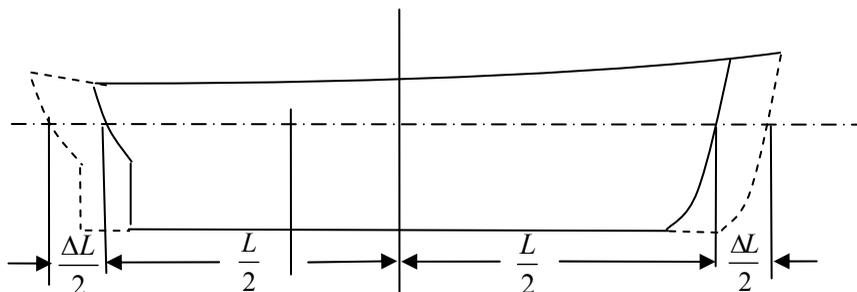


Рис. 9.4

За счет удлинения можно сместить все переборки и надстройку, а с ними и все оборудование судна в нос или корму на расстояние $\frac{\Delta L}{2}$.

Предполагается, что водоизмещение судна не изменяется от его удлинения. Это возможно в том случае, если изменение водоизмещения и веса корпуса при удлинении судна компенсируется изменением других элементов. В силу этого удлинение создаст дифференцирующий момент $M = (D - P_{кр}) \frac{\Delta L}{2}$, который приведет к изменению абсциссы ЦТ судна на величину

$$\Delta x = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{P_{кр}}{D} \right) \Delta L. \quad (9.9)$$

Из формулы (9.9) можно определить приращение длины судна, удовлетворяющее условиям удифферентовки. Удлинение приведет к пересмотру всех принятых ранее элементов судна. Следовательно, длина судна оказывает существенное влияние на условия удифферентовки. Во многих случаях, и особенно при расположении машинных отделений в корме, условия удифферентовки ограничивают практически низкий предел длины судна.

Сущность удифферентовки путем изменения архитектурного типа судна состоит, например, в том, что судно проектировалось как

трехостровное, но для перемещения ЦТ судна в корму потребовалось изменить его архитектуру, перейти к типу судна с удлинненным ютом. В этом случае в корме появляется дополнительный твиндек, выделенный штриховкой, который может быть использован для перевозки груза (рис. 9.5).



Рис. 9.5. Схема удифферентовки путем изменения архитектурного типа судна

К такому же результату можно прийти путем перехода к *квартердечному судну*.

Этот способ очень эффективен, но он приводит к изменению нагрузки, устойчивости, высоты надводного борта, удельной вместимости, а все это – к пересмотру принятых ранее элементов судна.

Минимальная осадка судна носом и кормой в балластном пробеге лимитируется в корме нормальной работой винтов, а в носу – предотвращением повреждений днища от гидродинамических ударов. Осадка в корме должна быть такой, чтобы диаметр винта погружался не менее чем на 80 %, а в тяжелых условиях (Северная Атлантика) и на 100 %. Осадка носом выбирается в пределах 1–3,0 % от длины судна l , то есть $T_H = (0,01 \div 0,03)L$.

9.4. Проверочный расчет высоты надводного борта судна по правилам грузовой марки

Одним из основных элементов судна является высота его надводного борта, измеряемая посредине длины судна от грузовой (конструктивной) ватерлинии до верхней водонепроницаемой палубы.

Минимально необходимая высота надводного борта $\frac{B}{T}$ (рис. 9.6) выбирается из условия обеспечения необходимого запаса плавучести

чести, прочности, остойчивости и отсутствия систематического заливания водой верхней палубы судна во время хода.

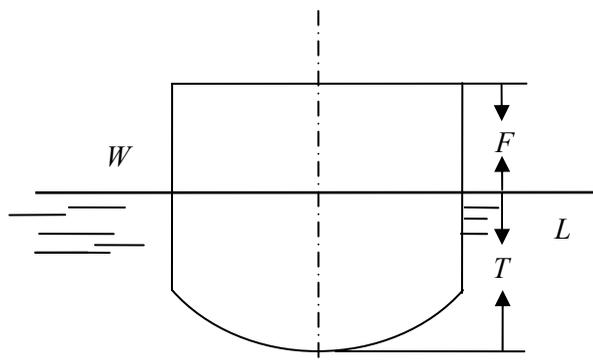


Рис. 9.6. Схема расчета высоты надводного борта судна

Отношение высоты борта к осадке связано с высотой надводного борта соотношением $\frac{H}{T} = \frac{T + F}{T} = 1 + \frac{F}{T}$. Но отношение $\frac{H}{T}$ лимитирует величину вместимости судна. Поэтому при назначении величины высоты надводного борта приходится считаться и с необходимостью получения достаточной кубатуры корпуса судна.

В РФ и РБ высота надводного борта регламентируется правилами «Назначения величины минимального надводного борта для судов как совершающих международные рейсы, так и для судов внутреннего плавания», разработанными Регистром Союза ССР в 1969 г. на основе международной Лондонской конвенции 1966 г., посвященной Правилам о грузовой марке морских судов, принятым взамен Правил 1930 г.

В соответствии с этими Правилами все суда по высоте надводного борта являются судами с минимальным надводным бортом, хотя допускаются и суда с избыточным надводным бортом. Разновидность судов с избыточным надводным бортом – шельтердечные суда, характеризующиеся наличием «обмерного отверстия». Однако по новым Правилам при определении величины надводного борта в расчет принимаются только закрытые надстройки, имеющие в торцовых стенках и на палубах надстроек такие закрытия отверстий, которые

исключают попадание воды внутрь надстроек при любом состоянии моря, в то время как по Правилам 1930 г. отсутствие таких закрытий приводило только к сокращению расчетов длины надстроек. Вследствие этого по новым правилам шельтердечные суда должны будут рассматриваться как не имеющие надстроек и их осадка должна быть уменьшена.

Рассматриваемые Правила определения минимально допустимой высоты надводного борта распространяются на все морские суда с валовой вместимостью свыше 150 рег. т и длиной свыше 24 м, за исключением военных, а также рыболовных судов, прогулочных яхт, спортивных и других судов, которые не перевозят ни груза, ни пассажиров.

Все суда, подпадающие под действие указанных Правил, разбиваются на 2 типа – А и В. К типу А относятся суда, спроектированные для перевозки только жидких грузов наливом (танкеры); к типу В – сухогрузные, пассажирские и все остальные суда, кроме наливных.

Суда типа А должны обладать, во-первых, высокой конструктивной непрерывностью его открытой палубы и, во-вторых, высокой степенью безопасности при затоплении, которая обуславливается малым коэффициентом проницаемости заполненных грузовых помещений и обычно предусматриваемой степенью деления судна на отсеки.

Для каждого типа судна назначается своя, минимально допустимая высота надводного борта, зависящая от размеров судна и его конструктивных особенностей.

Надводный борт судов задается в функции их длины применительно к стандартному судну, отличающемуся следующими особенностями:

- а) судно не имеет надстроек;
- б) коэффициент общей полноты судна при осадке 85 % от высоты борта ($T = 0,85H$) равен 0,68;
- в) отношение длины судна к высоте борта равно 15,0;
- г) судно имеет стандартную седловатость.

После определения базисного надводного борта или исходного табличного надводного борта по таблицам вычисляются поправки на отступления от перечисленных расчетных условий. Исправленный надводный борт определяется путем суммирования табличного надводного борта с указанными поправками, которые могут быть как положительными, так и отрицательными. Полученная цифра является летним надводным бортом для плавания в соленой воде.

В базисных таблицах дается высота надводного борта в предположении, что объем закрытых надстроек должен быть частично учтен в запасе плавучести судна и что при равных условиях судно с более развитыми закрытыми надстройками удовлетворяет более высоким требованиям в отношении безопасности плавания, а поэтому при увеличении относительной длины надстроек надводный борт судна уменьшается.

Надводный борт увеличивается с повышением коэффициента общей полноты, так как при всех прочих равных условиях судну с более высоким значением коэффициента общей полноты соответствует больший изгибающий момент. С увеличением седловатости палубы запас плавучести судна увеличивается, а это позволяет несколько уменьшить его надводный борт. Увеличение отношения $\frac{L}{H}$ хотя и влияет на F , однако почти не оказывается на отношении $\frac{H}{T}$.

Для сухогрузных судов с деревянными люковыми закрытиями, расположением грузовых люков на открытой палубе в открытом районе, то есть в пределах одной четверти длины судна от носового перпендикуляра, введен по новым Правилам своеобразный «штраф» в виде некоторой надбавки к табличному (базисному) надводному борту. Причем для судов длиной 108 м и менее базисный надводный борт оказывается больше на 50 мм, чем у судов типа В по таблице. А для судов длиной от 109 до 200 м базисный надводный борт после введения поправки увеличивается на 3,5–11 % пропорционально увеличению длины. Для судов, длина которых превышает 200 м, надбавка устанавливается Регистром РФ.

Кроме того, новыми Правилами введена дополнительная поправка, предусматривающая увеличение величины надводного борта для малых (длиной менее 100 м) судов с небольшими надстройками, расчетная длина которых менее 0,35 длины судна.

Введено также нормирование высоты надводного борта до открытой палубы в носовой оконечности судна.

Установлено, что при выполнении определенных требований к конструкции сухогрузных судов (имеются в виду рудовозы) величина надводного борта может быть уменьшена.

Введены некоторые требования к подразделению судов на отсеки, без выполнения которых судам, начиная с определенной длины, нельзя назначать наименьший надводный борт, разрешаемый Правилами.

Надводный борт фиксируется на судне грузовой маркой и отмечается в Международном свидетельстве о грузовой марке, которое должно быть на каждом судне. Грузовая марка наносится на миделе по обоим бортам судна. Центр круга и верхняя кромка горизонтального диаметра грузовой марки соответствуют максимальной осадке, до которой судно может быть загружено по так называемую летнюю грузовую марку. Этим и фиксируется минимально необходимая высота надводного борта. Грузовая марка лесовоза несколько иная.

Зависимость высоты надводного борта судна-эталона от его длины, на основе отмеченных ранее геометрических соотношений может быть получена в виде

$$F_0 = (H - T) = \left(\frac{L}{15} - 0,85 \frac{L}{15} \right) = 0,01L. \quad (9.10)$$

Высота надводного борта судна-эталона, получаемая по формуле (9.3), будет обеспечивать одинаковый запас плавучести при любой длине судна.

В действительности для небольших судов длиной до 66 м значения базисной высоты надводного борта меньше, чем полученные по формуле (9.3), и наоборот, начиная с длины более 66 м величина базисной высоты надводного борта значительно возрастает по сравнению с получаемой по формуле (9.3).

Поэтому относительные запасы плавучести у рассматриваемых судов больших размеров будут также больше, чем у небольших судов.

Значительное увеличение базисной высоты надводного борта на судах по мере роста их длины происходит потому, что суда в открытых морских бассейнах встречают в большинстве случаев волны длиной не менее 90–100 м, на которые малое судно всходит лучше, чем судно длиной, соизмеримой с длиной волны. В силу этого у большого судна погружение оконечностей в воду будет большим, следовательно, и заливаемость водой его верхней палубы будет сильнее. Чтобы обеспечить как можно меньшую заливаемость больших судов, высоту их надводного борта принято делать относительно большей.

Ниже в табл. 9.3 для судов типа А и В с неограниченным районом плавания представлены базисные высоты летнего надводного борта, относящиеся к судну-этalonу, имеющему определенную форму корпуса и соответствующее конструктивное устройство.

Таблица 9.3

**Базисный надводный борт для судов
неограниченного района плавания**

Длина L , м		24	50	100	150	200	250	300	365
Высота надводного борта F_0 , мм	Суда типа А	200	443	1135	1968	2612	3012	3262	3433
	Суда типа В	200	443	1272	2315	3264	4018	4630	5303

Табл. 9.3 дана для танкеров (суда типа А) и в их остальных судов (суда типа В).

Следует отметить, что новыми Правилами длина судов, для которых установлена базисная высота надводного борта, увеличена до 365 м по сравнению с максимальной, равной 231 м по Правилам 1930 г.

Чтобы определить минимально допустимую высоту надводного борта действительного судна, необходимо выбранную в таблице базисную высоту надводного борта F_0 надлежащим образом исправить, найдя для этой цели соответствующие поправки к ней.

В общем случае минимально допустимая высота летнего надводного борта реального судна будет

$$F = KF_0 + \Delta F_n + \Delta F_e + \Delta F_c + \Delta F_{\text{пб}} + \Delta F, \quad (9.11)$$

где F_0 – базисная высота летнего надводного борта судна в мм, выбираемая по табл. 9.3;

K – поправка на коэффициент общей полноты;

ΔF_n – поправка на высоту борта в мм;

ΔF_e – поправка на надстройки и ящики в мм;

ΔF_c – поправка на отклонение седловатости от стандартной в мм;

ΔF – надбавка к величине надводного борта судов типа В длиной менее 100 м, имеющих надстройки расчетной длины до $0,35L$ в мм.

Поправка на коэффициент общей полноты.

Множитель K в уравнении (9.11), учитывающий поправку на отклонение фактического коэффициента общей полноты при осадке $T = 0,85H$ от стандартного коэффициента 0,68, соответствующего судну-эталону, будет

$$K = \frac{\delta + 0,68}{1,36}. \quad (9.12)$$

В случае, когда $\delta < 0,68$, множитель K принимается равным единице с тем, чтобы поддержать необходимую высоту борта для судов с малым δ .

Поправка на высоту борта.

Поправка на высоту борта судна ΔF_n производится в случае, когда $\frac{L}{H} = 15$. Если у действительного судна $H > \frac{L}{15}$, то величина его надводного борта увеличивается при любых длинах надстроек на величину ΔF_n , вычисляемую по формуле (9.13)

$$\Delta F_n = \left(H - \frac{L}{15} \right) R, \quad (9.13)$$

где

$$\left. \begin{array}{l} R = \frac{L}{0,48}, \text{ если } L < 120 \text{ м} \\ \text{и} \\ R = 250, \text{ если } L \geq 120 \text{ м} \end{array} \right\}. \quad (9.14)$$

При $H < \frac{L}{15}$ надводный борт судна уменьшается только тогда, когда оно имеет закрытые надстройки, простирающиеся, по крайней мере, не менее чем на $0,6L$ в средней части судна, или сплошной ящик, или сочетание отдельных закрытых надстроек с ящиком, идущих непрерывно вдоль всей длины судна. Величина вычета определяется по формулам (9.13) и (9.14). Когда высота надстроек

или ящиков меньше стандартной, вычет уменьшается пропорционально отношению действительной высоты к стандартной.

Вычеты на надстройки и ящики.

Отрицательная поправка (вычет) ΔF_e , учитывающая влияние надстроек и ящиков, определяется для судов с расчетной длиной надстроек и ящиков, равной длине судна L , по приведенным ниже данным в табл. 9.4.

Таблица 9.4

Значения поправки (вычета) ΔF_e для судов с расчетной длиной надстроек и ящиков, равной длине судна L

Длина судна, м	24	85	122 и более
Вычет на надстройки и ящики ΔF_e , мм	350	860	1070

Для судов промежуточной длины вычет ΔF_e находится путем линейной интерполяции.

Для судов, суммарная расчетная длина надстроек и ящиков которых l_p меньше длины судна L , вычет в процентах от указанных выше величин должен быть получен отдельно для судов типа А и В по следующим данным, приведенным в табл. 9.5, 9.6.

Таблица 9.5

Процент вычета % ΔF_e на надстройки и ящики для судов типа А

Суммарная расчетная относительная длина надстроек и ящиков $\frac{l_p}{L}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Процент вычета для надстроек и ящиков	0	7	14	21	31	41	52	63	75,3	87,7	100

Проценты вычетов для промежуточных длин надстроек и ящиков должны определяться линейной интерполяцией.

Таблица 9.6

**Процент вычетов $\% \Delta F_c$ на надстройки и ящики
для судов типа В**

Суммарная расчетная относительная длина надстроек и ящиков $\frac{l_0}{L}$										
0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1

Окончание табл. 9.6

Тип надстроек											
Все типы с баком и без отдельной средней надстройки	0	5	10	15	23,5	32	46	63	75,3	87,7	100
Все типы с баком и отдельной средней надстройкой	0	6,3	12,7	19	27,5	36	46	63	75,3	87,7	100

При промежуточных значениях расчетных длин надстроек вычет находится путем линейной интерполяции.

Для судов типа В, у которых расчетная длина средней отдельной надстройки меньше $0,2L$, процентный вычет определяется путем интерполяции между цифрами, приведенными в верхней и нижней строчках.

Если расчетная длина бака на судах типа В больше, чем $0,4L$, то значения процентных вычетов должны приниматься из нижней строки. Если же расчетная длина бака меньше, чем $0,07L$, то указанные выше значения процентных вычетов должны быть уменьшена на величину

$$\frac{5(0,07L - l_8)}{0,07L}, \quad (9.15)$$

где l_8 – расчетная длина бака в м.

Поправка на отклонение от стандартного профиля седловатости.

Поправка на отклонение от стандартного профиля седловатости палубы ΔF_c определяется в зависимости от величины недостатка или избытка седловатости по выражению

$$\Delta F_c = c \left(0,75 - \frac{l_n}{2L} \right), \quad (9.16)$$

где c – величина недостатка или избытка седловатости;

l_n – суммарная длина закрытых надстроек в м;

L – длина судна в м.

Седловатость измеряется от палубы у борта до базисной линии, проведенной параллельно килевой линии через линию седловатости по середине длины судна.

Ординаты стандартного профиля седловатости в зависимости от длины судна L , измеряемой в метрах, в долях от седловатости на носовом перпендикуляре (НП), измеряемой в миллиметрах, приводятся в табл. 9.7.

Таблица 9.7

Ординаты стандартного профиля седловатости

Положение ординаты по длине судна от НП	Носовая половина				Кормовая половина			
	НП	$1/6L$	$1/3L$	$\frac{L}{2}$	$\frac{L}{2}$	$2/3L$	$5/6L$	КП
Ординаты в долях f_n	$f_n = 16,7L + 500$	$0,444 f_n$	$0,112 f_n$	0	0	$0,056 f_n$	$0,222 f_n$	$0,5 f_n$
Коэффициент	1	3	3	1	1	3	3	1

Как видно из таблицы, стандартная седловатость на кормовом перпендикуляре (КП) в два раза меньше стандартной седловатости в носу.

Избыток или недостаток седловатости судна по отношению к стандартной седловатости определяется следующим образом.

В случае отличия профиля седловатости от стандартного четыре ординаты носовой и кормовой половин профиля умножаются на

соответствующие коэффициенты, приведенные в последней строчке табл. 9.7. Затем определяется разность между суммами соответствующих произведений действительной и стандартной седловатостей. Эта разность, поделенная на 8, и определяет недостаток или избыток седловатости в носовой и кормовой половинах судна. Среднее арифметическое избытка или недостатка в носовой и кормовой половинах определяет избыток или недостаток седловатости c судна.

При недостаточной седловатости в носовой оконечности судна избыток седловатости в корме не принимается во внимание, а учитывается только недостаток ее в носу.

При избыточной седловатости в носовой оконечности судна и при седловатости в кормовой оконечности не менее 75 % от стандартной избыток седловатости в носу и недостаток седловатости в корме учитываются полностью. При седловатости в корме менее 50 % от стандартной избыток седловатости в носу не учитывается, а учитывается только недостаток ее в корме. Если седловатость в корме составляет 50–75 % стандартной, то учитывается пропорциональная поправка на избыток седловатости в носу и полный недостаток седловатости в корме.

При седловатости меньше, чем стандартная, поправка на ее недостаток, вычисленная по формуле (9.7), прибавляется к надводному борту.

Поправка на избыток седловатости, вычисленная по формуле (9.7), вычитается из надводного борта на судах, у которых закрытая надстройка простирается на $0,1L$ в нос и в корму от середины длины судна и не учитывается на судах, у которых нет закрытой надстройки, прикрывающей середину длины судна.

Если закрытая надстройка простирается за середину длины судна на менее на $0,1L$ в нос и в $0,1L$ корму, то вычет должен определяться линейной интерполяцией. Поправка на избыток седловатости при

этом уменьшается в отношении $\frac{a+b}{0,2L}$, где a и b – расстояние в м,

измеренное от середины длины судна до носовой и кормовой переборок закрытой средней надстройки соответственно.

Если значение a и b превышает $0,1L$, то оно принимается равным $0,1L$. Причем максимальный вычет на избыток седловатости во всех случаях не должен приниматься более 125 мм на 100 м длины судна.

Поправка на положение палубной линии.

Если действительная высота борта до верхней кромки палубной линии больше или меньше H , то разность между высотами $\Delta F_{\text{пб}}$ соответственно прибавляется к надводному борту или вычитается из него.

Поправка к надводному борту для судов длиной менее 100 м.

Надбавка к величине табличного надводного борта судов типа В длиной менее 100 м, имеющих закрытые надстройки с расчетной длиной до $0,35L$, вычисляется по формуле (9.8)

$$\Delta F = 7,5(100 - L) \left(35 - \frac{l_p}{L} \right), \text{ мм}, \quad (9.17)$$

где l_p – расчетная длина надстройки в м;

L – длина судна в м.

Эта надбавка в мм приводит к заметному увеличению надводного борта малых судов с короткими надстройками.

Регламентирование минимальной высоты надводного борта в носовой оконечности судна.

Регламентирование Правилами 1966 г. минимальной высоты надводного борта в носовой оконечности судна сводится к тому, что высота надводного борта в носу, определяемая как вертикальное расстояние на носовом перпендикуляре между ватерлинией, соответствующей назначенному летнему надводному борту и наибольшему расчетному дифференту на нос, и верхней кромкой открытой палубы у борта, должна быть не менее

$$F_{\text{н}} > 56L \left(1 - \frac{L}{500} \right) \left(\frac{1,36}{\delta + 0,68} \right), \text{ мм}; \quad (9.18)$$

для судов длиной менее 250 м и не менее

$$F_{\text{н}} > 7000 \left(\frac{1,36}{\delta + 0,68} \right) \text{ мм}; \quad (9.19)$$

для судов длиной 250 м и более, где δ – коэффициент общей полноты, должна приниматься не менее 0,68.

При этом отмечается, что если такая высота достигнута за счет седловатости, то последняя должна простираться не менее, чем на 15 % длины судна в корму от носового перпендикуляра и ни одна из ее точек не должна располагаться ниже линии допустимой седловатости. Допустимая седловатость представляет собой квадратичную параболу, касательную на $0,35L$ от носового перпендикуляра к горизонтальной прямой, проведенной через точку действительной седловатости на середине длины судна и проходящую через точку на носовом перпендикуляре, соответствующую минимальной высоте надводного борта в носу.

Если же минимальная высота надводного борта в носу, регламентируемая соотношениями (9.18) и (9.19), обеспечивается за счет носовой надстройки (бака), то длина такой надстройки должна быть не менее $0,07L$ и она должна быть закрытой.

10. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НЕПОТОПЛЯЕМОСТИ СУДНА

В соответствии с Правилами Регистра Республики Беларусь судоходства судно должно удовлетворять требованиям к делению на отсеки. Судно считается отвечающим требованиям Правил, если фактический вероятностный индекс деления на отсеки не меньше, чем требуемый вероятностный индекс. В курсовом проекте вероятностные индексы не определяются, а проводится проверка непотопляемости и аварийной остойчивости при затоплении одного отсека. При этом желательно рассмотреть наиболее неблагоприятный случай – отсек большого объема и наиболее удаленный от мидельшпангоута. Обычно при кормовом расположении машинного отделения (МО) и надстройки это отсек МО.

При выполнении расчетов аварийной посадки и остойчивости должны быть приняты следующие повреждения.

Баржа:

протяженность по длине – $\frac{1}{3}L^{\frac{2}{3}}$, или 14,5 м (в зависимости от того,

что меньше);

протяженность по ширине, измеренная от внутренней поверхности бортовой обшивки под прямым углом к ДП на уровне ГВЛ – $\frac{1}{5}B$;

протяженность по вертикали – от основной плоскости неограниченно вверх.

Для нефтеналивных судов посадка и остойчивость поврежденного судна должны отвечать требованиям Правил как при повреждении борта, так и при повреждении днища.

Размеры днищевых повреждений:

протяженность по длине $\frac{1}{3}L^{\frac{2}{3}}$, или 14,5 м (в зависимости от того,

что меньше) на длине $0,3L$ от носового перпендикуляра, $\frac{1}{3}L^{\frac{2}{3}}$ или 5,0 м (в зависимости от того, что меньше) на остальной части длины судна;

протяженность по ширине $B/6$ или 10 м (в зависимости от того, что меньше), на длине, равной $\frac{1}{3}L$ от носового перпендикуляра, $B/6$, или 5 м (в зависимости от того, что меньше) на остальной части длины судна;

протяженность по высоте, измеренная в ДП от ОП, $B/15$, или 6,0 м (в зависимости от того, что меньше).

Проверку непотопляемости следует проводить по способу постоянного водоизмещения.

Задачей расчета является определение посадки и остойчивости при затоплении какого-либо отсека.

При затоплении отсека 3-й категории следует пользоваться следующими формулами:

площадь КВЛ после повреждения отсека

$$S' = S - s, \quad (10.1)$$

где S – площадь КВЛ до затопления отсека;

s – потерянная площадь КВЛ;

координаты ЦТ КВЛ S' после повреждения

$$x'_{f} = \frac{Sx_f - sx_s}{S'}; \quad y'_{f} = -\frac{sy(s)}{S'}, \quad (10.2)$$

где x_f – абсцисса ЦТ площади КВЛ;

x_s, y_s – координаты ЦТ потерянной площади s ;
потерянные моменты инерции площади s

$$\begin{aligned}i_{px} &= i_{sx} + sy_s^2 + S'y_f'^2; \\ i_{py} &= i_{sy} + sx_s^2 + S'x_f'^2 - Sx_s^2;\end{aligned}\tag{10.3}$$

изменение средней осадки

$$\Delta T = \frac{v}{s'},\tag{10.4}$$

где v – объем воды в затопленном отсеке по первоначальную КВЛ;

$v = \mu v_0$ (μ – коэффициент проницаемости отсека);
изменение поперечной метацентрической высоты

$$\Delta h = \frac{v}{V} \left(T + \frac{\Delta T}{2} - z_v - \frac{i_{px}}{v} \right),\tag{10.5}$$

где V – объемное водоизмещение;

z – координата ЦТ объема v ;

изменение продольной метацентрической высоты

$$\Delta H = \frac{v}{V} \left(T + \frac{\Delta r}{2} - z_v - \frac{i_{py}}{v} \right) \approx -\frac{ipy}{v};\tag{10.6}$$

новые значения метацентрических высот

$$h_1 = h + \Delta h; \quad H_1 = H + \Delta H;\tag{10.7}$$

угол крена

$$\theta = \frac{v(y - y_f')}{vh_1},\tag{10.8}$$

где y – координата ЦТ объема v ;

угол дифферента

$$\psi = \frac{v(x_v - x'_f)}{VH_1}, \quad (10.9)$$

где x – абсцисса ЦТ объема v ;
осадка носом

$$T_{H\psi} = T_H + \Delta T + \psi \left(\frac{L}{2} - x'_f \right); \quad (10.10)$$

осадка кормой

$$T_{K\psi} = T_K + \Delta T - \psi \left(\frac{L}{2} + x'_f \right), \quad (10.11)$$

где T_H, T_K – первоначальные осадки судна носом и кормой.

При симметричном относительно ДП затоплении отсека $y_s = 0$ и ряд предыдущих формул переписется в виде:

$$x'_f = \frac{Sx_f - sx_s}{S'}; \quad y'_f = 0, \quad (10.12)$$

$$i_{px} = i_{sx} + sy_s^2; \quad i_{py} = i_{sy} + sx_s^2 + S'x_f'^2 - Sx_f^2, \quad (10.13)$$

$$\theta = 0. \quad (10.14)$$

Расчет непотопляемости удобно проводить в табличной форме (например, табл. 10.1).

**Проверка непотопляемости при затоплении отсека
(симметричное заполнение)**

№ п/п	Наименование величин	Размерность	Обозначение и формула	Величина	Примечание
1	2	3	4	5	6
1	Водоизмещение	м ³	V		
2	Первоначальная средняя осадка	м	T_{cp}		По грузозовому размеру
3	Объем затопленного отсека по КВЛ	м ³	$v_0 = \frac{l}{6}(\omega_A + 4\omega_B + \omega_C)$		По строевой по шпангоутам или по (10.14)
4	Объем влившейся воды в затопленный отсек по КВЛ	м ³	$v = \mu v_0$		μ – определяется по Правилам ($\mu = 0,85$ для машинного отделения)
5	Площадь КВЛ до повреждения	м ²	S		По гидростатическим кривым
6	Потерянная площадь КВЛ	м ²	$S = \frac{l}{3}(y_A + 4y_B + y_C)$		По теоретическому чертежу или по (10.12)
7	Действующая площадь КВЛ после повреждения	м ²	$S' = S - s$		
9	Абсцисса и ордината ЦТ потерянной площади s	м	$x_S = \frac{y_A x_A + 4y_B x_B + y_C x_C}{y_A + 4y_B + y_C}$ $y_S = 0$		См. примечание (10.13)
10	Абсцисса ЦТ действующей КВЛ	м	$x'_f = \frac{Sx_f - sx_s}{S'}$		По формуле (10.2)

1	2	3	4	5	6
11	Ордината ЦТ действующей КВЛ	м	$y'_f = 0$		По формуле (10.2)
12	Абсцисса ЦТ объема v	м	$x_v = x_B - \frac{l(\omega_A - \omega_C)}{6(6\omega_A + 4\omega_B + \omega_C)}$		См. примечание (10.17)
13	Ордината ЦТ объема v	м	$z_v = T \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{6} \frac{ST}{v} \right)$		См. примечание (10.8)
14	Собственный момент инерции потерянной площади S	м ⁴	$i_{sx} = \frac{i}{9} (y_A^3 + 4y_B^3 + y_C^3)$		См. примечание (10.15)
15	Собственный момент инерции потерянной площади S	м ⁴	$i_{sy} = \frac{l^3}{60} (3y_A^3 + 4y_B^3 + 3y_C^3)$		См. примечание (10.16)
16	Потерянный момент инерции	м ⁴	$i_{px} = i_{sv} + sy_s^2$		По формуле (10.3)
17	Потерянный момент инерции	м ⁴	$i_{py} = i_{sy} + sx_s^2 + Sx'_f{}^2 - Sx_f^2$		По формуле (10.3)
18	Изменение средней осадки	м	$\Delta T = \frac{v}{S'}$		
19	Изменение поперечной метацентрической высоты	м	$\Delta h = \frac{v}{V} \left(T + \frac{\Delta T}{2} - z_v - \frac{i_{px}}{v} \right)$		По формуле (10.5)
20	Изменение продольной метацентрической высоты	м	$\Delta H = \frac{v}{V} \left(T + \frac{\Delta T}{2} - z_v - \frac{i_{py}}{v} \right) \approx - \frac{i_{py}}{v}$		По формуле (10.6)
21	Первоначальное значение поперечной метацентрической высоты	м	$h = r + z_c - z_g$		Из расчета начальной остойчивости
22	Первоначальное значение продольной метацентрической высоты	м	$H = R + z_c - z_g$		Из расчета начальной остойчивости

1	2	3	4	5	6
23	Новое значение поперечной метацентрической высоты	м	$h_1 = h + \Delta h$		
24	Новое значение продольной метацентрической высоты	м	$H_1 = H + \Delta H$		
25	Угол дифферента	рад	$\psi = \frac{v(x_v - x'_f)}{VH_1}$		Формула (10.9)
26	Осадка носом	м	$T_{H\psi} = T_H + \Delta T + \psi \left(\frac{L}{2} - x'_f \right)$		Формула (10.10)
27	Осадка кормой	м	$T_{k\psi} = T_k + \Delta T - \psi \left(\frac{L}{2} - x'_f \right)$		Формула (10.11)

После выполнения расчетов необходимо проверить, выполнены ли требования Правил, касающиеся обеспечения непотопляемости судна:

аварийная ватерлиния должна проходить не ниже предельной линии погружения. За предельную линию погружения можно принять линию палубы у борта, если ниже ее нет отверстий, через которые возможно дальнейшее распространение воды по судну;

поперечная метацентрическая высота до спрямления судна должна быть не менее 0,05 м;

максимальное плечо диаграммы не должно быть менее 0,1 м;

протяженность участка диаграммы с положительным плечом должна быть не менее 20°;

площадь участка диаграммы с положительным плечом должна быть не менее 0,0175 м·рад.

Примечание. Для определения посадки и остойчивости судна с затопленным отсеком необходимо знать геометрические характеристики этого отсека: площадь потерянной ватерлинии s и абсциссу ее ЦТ x_s , моменты инерции относительно продольной i_{sy} и поперечной оси i_{sx} , объем отсека v , абсциссу и ординату его ЦТ x , z . Определение этих характеристик можно выполнить, используя теоретический чертеж и строевую по шпангоутам. Однако эту проце-

дуру можно упростить, заменяя участок ветви строевой параболоми второй степени. Принятые обозначения приведены на рис. 10.1.

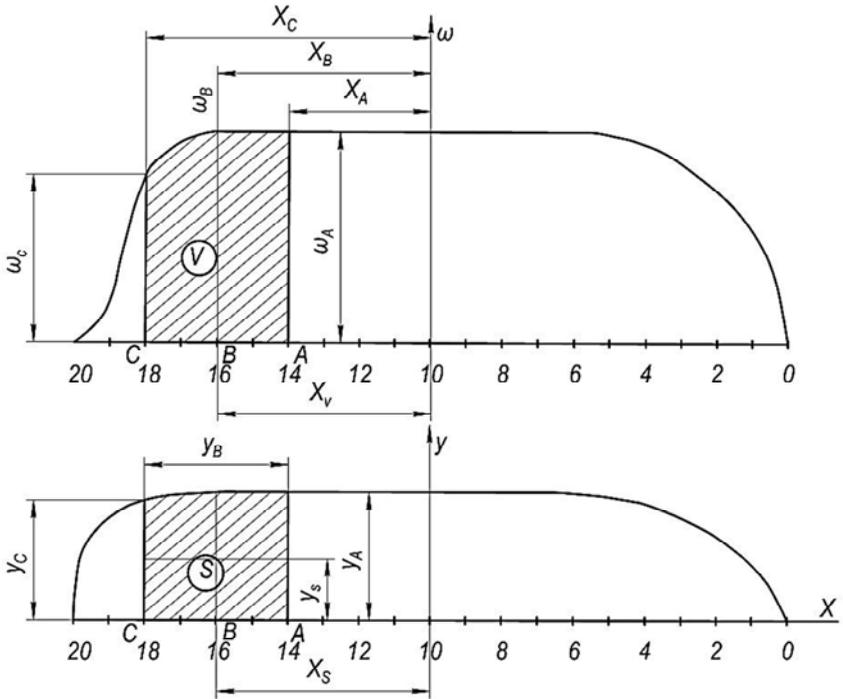


Рис. 10.1. Строевая по шпангоутам и КВЛ

На этом рисунке А и С – носовая и кормовая переборки затопляемого отсека, В – середина рассматриваемого отсека, l – длина отсека.

В этом случае:

потерянная площадь ватерлинии (на оба борта)

$$S = \frac{1}{3}(y_A + 4y_B + y_C); \quad (10.15)$$

абсцисса ЦТ поперечной площади

$$x_S = \frac{y_A x_A + 4y_B x_B + y_C x_C}{y_A + 4y_B + y_C}; \quad (10.16)$$

объем затопленного отсека по КВЛ

$$v_0 = \frac{1}{6}(\omega_A + 4\omega_B + \omega_C); \quad (10.17)$$

собственный момент инерции потерянной площади относительно оси x' (параллельной координатной)

$$i_{sx} = \frac{i}{9}(y_A^3 + 4y_B^3 + y_C^3); \quad (10.18)$$

собственный момент инерции потерянной площади s относительно оси y' (параллельной оси координат)

$$i_{sy} = \frac{i^2}{60}(3y_A + 4y_B + 3y_C); \quad (10.19)$$

абсцисса ЦТ объема v

$$x_v = x_B - \frac{l(\omega_A - \omega_C)}{6(6\omega_A + 4\omega_B + \omega_C)}; \quad (10.20)$$

апликата ЦТ объема v

$$z_v = T \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{6} \frac{ST}{v} \right). \quad (10.21)$$

11. СОПРОТИВЛЕНИЕ СРЕДЫ ДВИЖЕНИЯ СУДНА

При решении различных проектировочных и эксплуатационных задач возникает необходимость в расчетной оценке ходкости судна. Ходкость – это способность судна перемещаться с заданной скоростью при наиболее эффективном использовании мощности судовой энергетической установки.

Для обеспечения ходкости судно снабжается энергетической установкой и двигателем, создающим силу, преодолевающую силу сопротивления воды движению судна.

При равномерном прямолинейном движении судна сила сопротивления воды R равна силе тяги движения T_B :

$$R = T_B. \quad (11.1)$$

Для судна, имеющего число винтов z_p с одинаковым распределение тяги,

$$T_B = R/z_p. \quad (11.2)$$

Для обеспечения этой тяги необходимо к движителю подвести мощность N_p , развиваемую главным двигателем с учетом потерь в валопроводе η_v

$$\eta_v = \frac{T_B v}{N_p}. \quad (11.3)$$

Достаточно надежно определить сопротивление воды можно после разработки теоретического чертежа, изготовления и испытания в опытовом бассейне модели судна.

В начальных стадиях проектирования судов, когда необходимо оперативно найти параметры ходкости судна, удовлетворяющие техническому заданию, этот способ неприемлем. Поэтому разработаны приближенные способы расчета сопротивления с помощью ограниченного числа известных параметров и коэффициентов.

Все современные приближенные способы расчета сопротивления основаны на испытании систематических серий моделей судов в опытовых бассейнах. Если обводы судна, для которого следует выполнить расчет, близки к обводам испытанных моделей, то такой приближенный способ может дать достаточно достоверные результаты.

В большинстве испытаний систематически изменяемыми параметрами являются: коэффициент полноты водоизмещения δ ; отношения $\frac{L}{B}$; положение абсциссы центра величины x_c ; формы обводов носовой и кормовой оконечности; влияние бульба.

Сопротивление при движении судна на тихой воде без учета сопротивления воздуха можно определить по формуле

$$R = R_{\text{тр}} + R_{\text{ост}}, \quad (11.4)$$

где $R_{\text{тр}}$ – сопротивление трения;

$R_{\text{ост}}$ – остаточное сопротивление.

Составляющую сопротивления трения с достаточной точностью можно определить аналитически

$$R_{\text{тр}} = (C_{Rm} + \Delta C_m) \frac{\rho v^2}{2} \Omega, \quad (11.5)$$

где C_{Rm} – коэффициент сопротивления трения, зависящий от вязкости жидкости и числа Рейнольдса для эквивалентной гладкой пластины.

Определить этот коэффициент можно по формуле Прандтля–Шлихтинга

$$C_{Rm} = \frac{0,455}{(\lg \text{Re})^{2,58}}.$$

Число Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{vL}{\nu},$$

где v – скорость судна, м/с;

L – расчетная длина судна, м;

ν – кинематический коэффициент вязкости.

Для «стандартной» температуры воды 4 °С принимают $\nu = 1257 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; ρ – плотность воды, т/м³; Ω – смоченная поверхность корпуса судна.

Смоченная поверхность корпуса судна складывается из смоченной поверхности голого корпуса Ω_0 и смоченной поверхности выступающих частей $\Omega_{\text{вч}}$

$$\Omega = \Omega_0 + \Omega_{\text{вч}}.$$

При наличии теоретического чертежа корпуса смоченную поверхность можно определить численным интегрированием

$$\Omega_0 = 2\Delta L \sum_{i=0}^{20} \left(l_i - \frac{l_0 + l_{20}}{2} \right),$$

где ΔL – теоретическая шпация;

l – полупериметр погруженной части шпангоутов;

i – номера шпангоутов.

Для транспортных судов с большими значениями коэффициента общей полноты смоченную поверхность можно определить по приближенной формуле В.А. Себеки:

$$\Omega_0 = LT \left\{ 2 + 1,37(\delta - 0,274) \frac{B}{T} \right\}.$$

Для одновинтовых судов площадь выступающих частей можно определить по формуле

$$\Omega_{вч} = (0,025 \div 0,030) \Omega_0,$$

для двухвинтовых судов – $\Omega_{вч} = (0,050 \div 0,055) \Omega_0$.

При определении смоченной поверхности корпуса по приближенной формуле и при наличии бульба необходимо полученное значение увеличить примерно на 2 %.

Коэффициент, получивший название надбавки на шероховатость, $\Delta C_{ш}$ для корпусов транспортных судов можно принимать равным $(0,4 \div 0,5) \cdot 10^{-3}$.

Остаточное сопротивление предлагается определить, используя результаты модельных испытаний судов с большой полнотой обводов [10].

Остаточное сопротивление определяется по формуле

$$R_{ост} = C_{R_0} \frac{\rho v^2}{2} \Omega, \quad (11.6)$$

где C_{R_0} – коэффициент остаточного сопротивления – определяется с учетом коэффициентов влияния

$$C_{R_0} = f \left(\delta, \frac{L}{B}, \frac{B}{T}, x_c, Fr \right).$$

Данные по коэффициенту сопротивления и коэффициентам влияния приведены для двух форм носовых обводов – цилиндрических и бульбовых, а также для сигарообразной кормы оконечности (рис. 11.1).

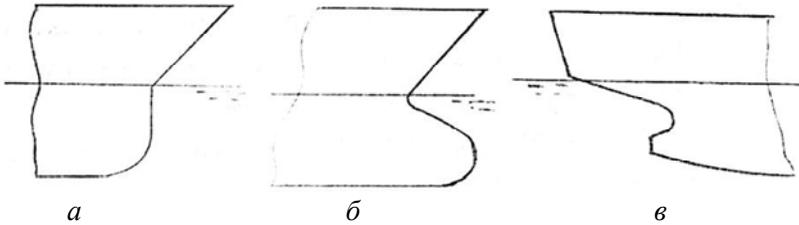


Рис. 11.1. Формы оконечностей судна:
a – цилиндрическая; *б* – бульбообразная; *в* – сигарообразная

Теоретические чертежи приведены на рис. 11.2–11.5.

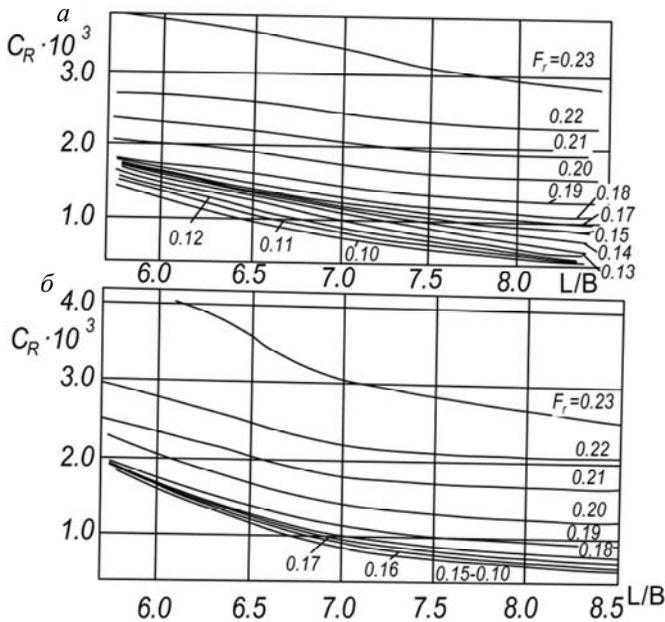


Рис. 11.2. Зависимость C_R от L/B ($\delta = 0,800$; $B/T = 2,7$; $\bar{x}_c = x_c/L = 0,020$):
a – цилиндрическая носовая оконечность; *б* – бульбовая носовая оконечность

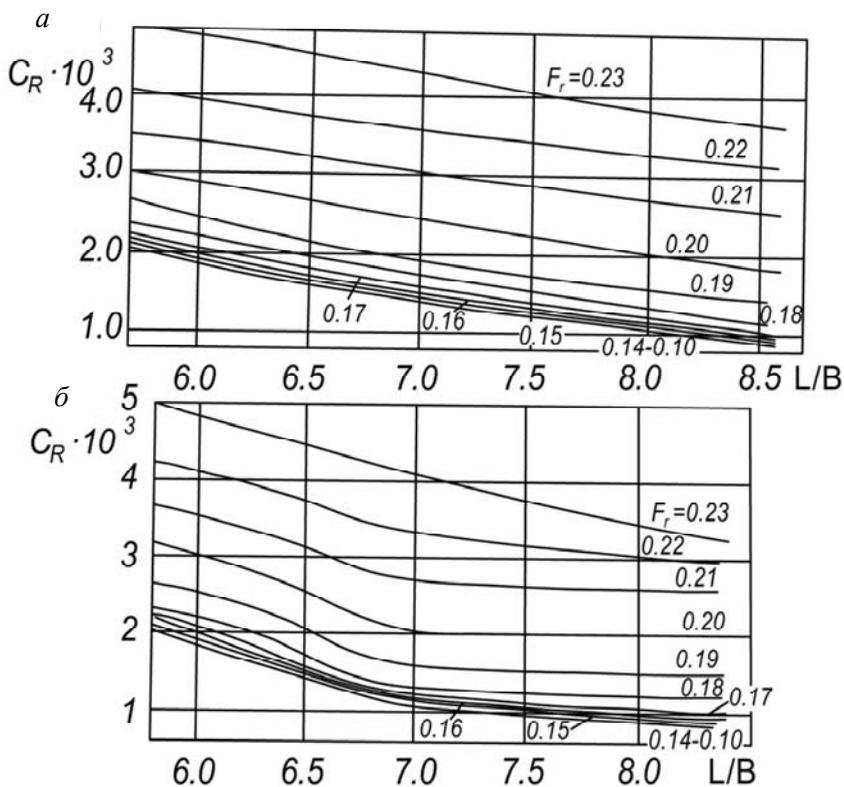


Рис. 11.3. Зависимость C_R от L/B ($\delta = 0,825$; $B/T = 2,7$; $\bar{x}_c = x_c/L = 0,020$):
 а – цилиндрическая носовая оконечность; б – бульбовая носовая оконечность

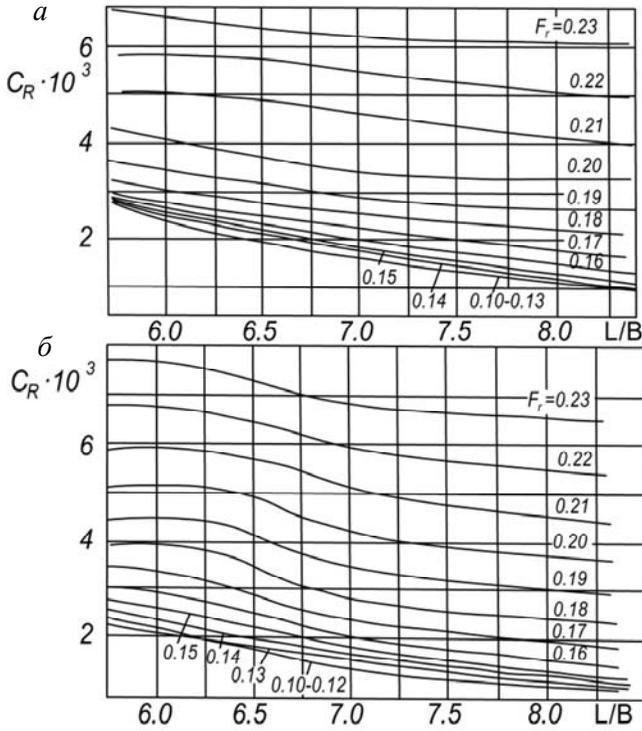


Рис. 11.4. Зависимость C_R от L/B ($\delta = 0,850$; $B/T = 2,7$; $\bar{x}_c = x_c/L = 0,020$):
 а – цилиндрическая юсовая оконечность; б – бульбовая носовая оконечность

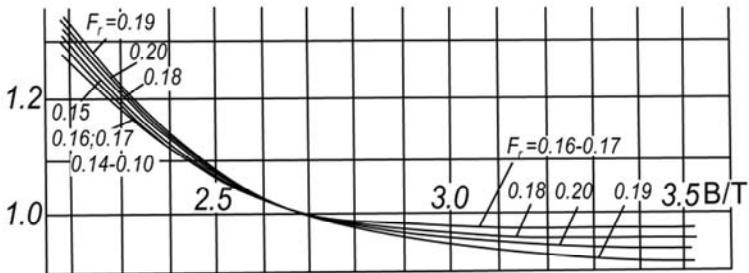


Рис. 11.5. Зависимость $k_{B/T} = \frac{C_{R(B/T)}}{C_{R(B/T=2,7)}}$ от B/T

Зависимость a_{x_c} и $a_{x_{c0}}$ представлена на рис. 11.6.

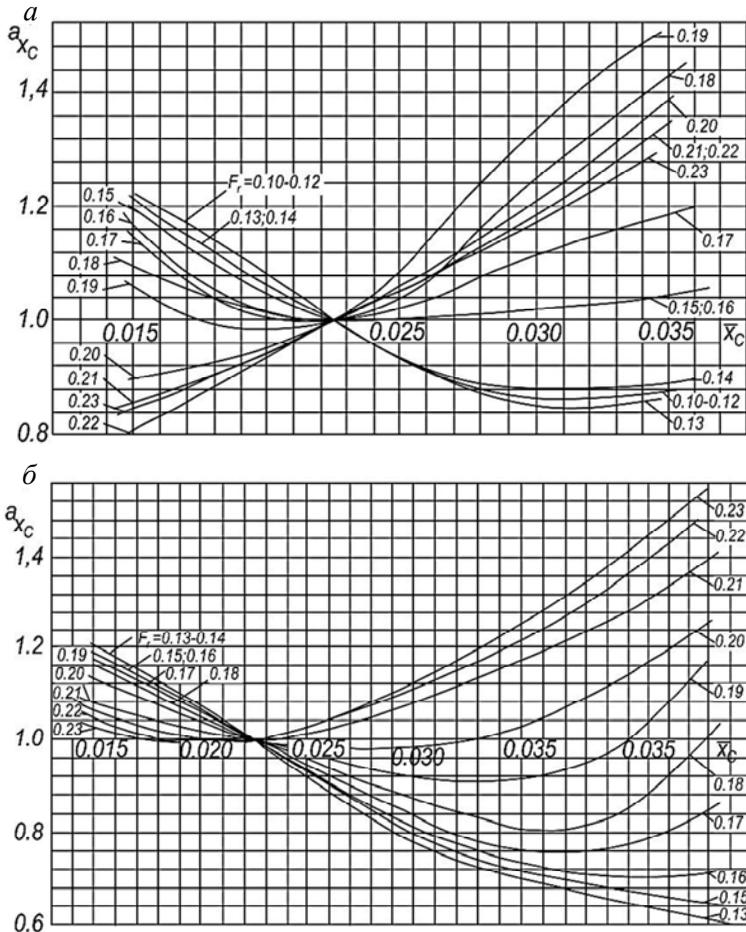


Рис. 11.6. Зависимость $a_{x_c} = \frac{C_{R(x_c)}}{C_{R(x_c=0,0225)}}$ от $\bar{x}_c = x_c/L$ для носовых обводов:

a – с заострением ГВЛ; b – с притуплением ГВЛ

Коэффициент остаточного сопротивления всех рассматриваемых форм с коэффициентами полноты $\delta = 0,8 \div 0,85$ определяется по формуле

$$C_{R_0} - C_R \left(\delta, \frac{L}{B} \right) k_{B/T} k_{x_c} k_A. \quad (11.7)$$

Коэффициент $C_R \left(\delta, \frac{L}{B} \right)$ снимается с диаграмм на рис. 11.2–11.4 с линейной интерполяцией по коэффициенту δ . Коэффициент $C_R(\text{Fr})$ может быть снят с зависимостей для судов, у которых коэффициент общей полноты δ близок к судну-прототипу.

Коэффициент влияния $k_{B/T}$ учитывает несоответствие расчетного и стандартного значений и для всех вариантов носовых обводов определяется по графику на рис. 11.5.

Коэффициент $k_{x_c} = \frac{a_{x_c}}{a_{\text{ср}}}$ вычисляется как отношение значений коэффициента влияния $a_{x_c} = \frac{C_{R(x_c)}}{C_{R(x_c=0,0225)}}$, определяется для расчетного значения \bar{x}_C и стандартного значения \bar{x}_{C_0} , указанного для различных x_{C_0} на рис. 11.2–11.4.

Если кормовые обводы отличаются от U -образных, вводится поправочный коэффициент $k_A = \frac{C_{R(A)}}{C_{R(U\text{-обр})}}$, значения которого находятся по табл. 11.1.

Таблица 11.1

Поправочные коэффициенты k_A на влияние формы кормовых обводов

Fr	$\delta = 0,800$		$\delta = 0,825$		$\delta = 0,850$	
	V -образная	Сигарообразная	V -образная	Сигарообразная	V -образная	Сигарообразная
1	2	3	4	5	6	7
0,12	0,914	1,096	0,696	0,752	0,784	0,602
0,13	0,809	1,020	0,689	0,769	0,811	0,610
0,14	0,758	0,969	0,696	0,787	0,834	0,624

Окончание табл. 11.1

1	2	3	4	5	6	7
0,15	0,750	0,969	0,724	0,794	0,875	0,700
0,16	0,758	1,060	0,740	0,802	0,890	0,746
0,17	0,838	0,956	0,795	0,769	0,920	0,780
0,18	0,900	0,908	0,831	0,880	0,941	0,839
0,19	0,900	0,945	0,875	0,884	0,998	0,860
0,20	0,868	0,972	0,867	0,867	0,941	0,825
0,21	0,938	0,938	0,831	0,884	0,916	0,825
0,22	0,922	1,030	0,880	0,955	0,926	0,855
0,23	0,914	1,070	0,702	0,740	0,795	0,610

Схема расчета сопротивления и буксировочной мощности приведена в табл. 11.2.

Таблица 11.2

Расчет сопротивления и буксировочной мощности

$$\Omega = \dots \text{ м}^2; \rho = \dots \text{ т/м}^3$$

№ п/п	Обозначения, формулы	Размерность	Численные значения						
			0,6v	0,6v	0,6v	0,6v	v	1,1v	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	Скорость v	м/с							
2	Числа Рейнольдса $Re = \frac{vL}{\gamma}; Re \cdot 10^{-6}$	—							
3	Коэффициент трения $C_{R_T} = \frac{0,455}{(\lg Re)^{2,58}}; C_{R_T} \cdot 10^3$	—							
4	Надбавка на шероховатость $\Delta C_{ш} \cdot 10^3$	—							
5	Сопротивление трения $R_{тр} = (C_{R_T} + \Delta C_{ш}) \frac{\rho v^2}{2} \Omega$	кН							

1	2	3	4	5	6	7	8	9
6	Числа Фруда $Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}}$	–						
7	$C_R \left(\delta, \frac{L}{B}, Fr \right) \cdot 10^3$ (по рис. 11.2–11.4)	–						
8	$k_{B/T}$ (по рис. 11.5)	–						
9	$k_{x_c} = a_{x_c} / a_{x_{c0}}$ (по рис. 11.6)	–						
10	k_A (по табл. 11.1)	–						
11	$C_{R_0} = C_R k_{B/T} k_{x_c} k_A;$ $C_{R_0} \cdot 10^3$	–						
12	Остаточное сопротивление $R_{ост} = C_{R_0} \frac{\rho v^2}{2} \Omega$	кН						
13	Полное сопротивление $R = R_{тр} + R_{ост}$	кН						
14	Буксировочная мощность $N_{\delta} = Rv$	кВт						

По результатам расчета строят графики зависимости буксировочного (полного) сопротивления и буксировочной мощности от скорости движения судна.

При заполнении табл. 11.2 значения скорости принимают от 0 до 1,2 расчетной скорости, определенной в техническом задании.

Для судов ледового плавания категорий ЛУ1–ЛУ9 необходимо вычислить дополнительное к сопротивлению воды чистое ледовое сопротивление от движения в обломках битого льда.

В расчетах необходимо учитывать следующее. Судам категории ЛУ1–ЛУ9 допускается самостоятельное плавание в мелкобитом разреженном льду сплоченностью $\bar{S} = 5 \div 7$ баллов с толщиной льда, указанной в табл. 11.3.

**Значения толщин льда и допустимой скорости
для судов ледового плавания**

Класс ледового усиления	Толщина льда, м	Допустимая скорость, узл.
Суда ЛУ1	0,40	5
Суда ЛУ2	0,55	
Суда ЛУ3	0,70	
Суда ЛУ4	0,80	8
Суда ЛУ5	1,00	
Суда ЛУ6	1,30	
Суда ЛУ7	1,70	
Суда ЛУ8	3,00	10
Суда ЛУ9	4,00	12

Расчет сопротивления обломков льда допускается производить по формуле В. Зуева:

$$R_{л} = \rho_{л} g B h^2 \left(0,13 \frac{B}{h} + 1,3 Fr_h + 0,5 Fr_h^2 \right) (2 - \bar{S}) \bar{S}^2, \quad (11.8)$$

где $\rho = 0,92$ – плотность льда, т/м³;

h – толщина льда, м;

Fr – число Фруда по толщине льда;

\bar{S} – функция сплоченности битого льда, определяемая по выражению

$$\bar{S} = \frac{\text{площадь канала, занятая битым льдом}}{\text{площадь канала}}. \quad (11.9)$$

При движении судна на взволнованной поверхности воды необходимо учитывать сопротивление от набегающих волн. Это дополнительное сопротивление можно определить по формуле Давидсона:

$$\Delta R_{в} = \frac{\rho(v+c)^2}{2\pi} B h_{в} (1 - \cos \varphi_{н}), \quad (11.10)$$

где $c = 1,25\sqrt{\lambda}$ – скорость распространения волны, м/с;

h_b – высота волны, м;

φ_n – угол входа носовой ветви КВЛ.

Максимальная высота волны определяется классом судна. Для определения длины волны можно использовать приближенную формулу $h = 0,17\lambda^{0,75}$.

Способы расчета сопротивления с другими коэффициентами общей полноты δ и соотношениями главных размерений $\frac{L}{B}$, $\frac{B}{T}$ приведены и в [18], и в [19].

12. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ

12.1. Расчет гребного винта

При работе над проектом судна проводятся проверочные расчеты ходкости, подбор и расчеты движителя, подбор главного двигателя. Прежде необходимо рассчитать сопротивление и буксировочную мощность по способам, приведенным в разд. 11. По результатам расчетов строятся кривые буксировочного сопротивления и буксировочной мощности в рассчитанном диапазоне скоростей.

Выбор типа движителя. Поскольку назначение движителя – преобразование мощности в полезную тягу, основным критерием для его выбора является степень эффективности этого преобразования – КПД движителя.

При скоростях хода до 30 км/ч для водоизмещающих судов обычного типа наивысшим КПД обладают гребные винты. Они наиболее просты и в конструктивном отношении, поэтому нашли преимущественное применение на судах. Водометные движители используются при ограниченной осадке и для защиты рабочего органа от повреждений. Жесткие требования к маневренным качествам могут быть причиной установки крыльчатых движителей.

Стремление повысить эффективность гребных винтов при больших нагрузках привело к использованию направляющих насадок.

Выбор числа движителей. Выгодной с точки зрения пропульсивных качеств является одновальная механическая установка. Однако

невозможность размещения винта необходимого диаметра заставляет иногда отказываться от нее. Другим основанием для увеличения числа гребных винтов является требование живучести судна. В вопросе о выборе числа движителей необходимо исходить из условий размещения главных механизмов и обеспечения управляемости судна.

При выборе числа движителей в ряде случаев целесообразно воспользоваться данными прототипа.

Расчет элементов движительного комплекса при выборе главной энергетической установки.

При выборе элементов проектируемого судна в первом приближении определена мощность энергетической установки по адмиралтейской формуле. На данном этапе выбираем реальную энергетическую установку, обеспечивающую заданную скорость хода при оптимальном движителе.

Расчет винта для данного судна делят на два этапа: предварительный и окончательный. В предварительном расчете определяется необходимая мощность двигателя и оптимальная частота вращения гребного винта. Найденные в предварительном расчете мощность и частота вращения, как правило, не соответствуют мощности и частоте конкретных двигателей, выпускаемых промышленностью. Поэтому по каталогам выбирают двигатель, проектные мощность и частота вращения которого (с учетом установки редуктора) наиболее близки к требуемым. После этого с учетом выбранного двигателя производят окончательный расчет ходкости, определяя оптимальные элементы гребного винта и достижимую скорость хода судна.

Предварительный расчет ведем в следующей последовательности.

1. Определяем коэффициенты взаимодействия винта гребного винта с корпусом судна.

Коэффициент попутного потока для бортового винта $\psi = 0,55\delta - 0,20$; для винта в диаметральной плоскости (ДП) $\psi = 0,50\delta - 0,05$, где δ – коэффициент общей полноты.

Коэффициент засасывания для бортового винта $t = 0,8\psi(1 + 0,25\psi)$ или для винта в ДП $t = 0,6\psi(1 + 0,67\psi)$.

2. Устанавливаем предельный диаметр винта, пользуясь приближенной зависимостью

$$D_B = (0,7 - 0,1(x-1))T,$$

где x – число движителей;

T – осадка судна.

3. Находим необходимый упор P и расчетную скорость винта v_p :

$$P = \frac{R(v)}{x(1-t)}, \quad v_p = v(1-\psi),$$

где v – скорость судна. Значение сопротивления $R(v)$ принимают для заданной скорости хода.

4. Оцениваем целесообразность применения направляющей насадки для гребного винта.

5. Оценить целесообразность применения насадки можно с помощью коэффициента нагрузки по упору.

$$\sigma = \frac{2P}{\rho v_p^2 F} = \frac{8P}{\rho v_p^2 \pi D_B^2},$$

где ρ – плотность воды;

F – площадь, ометаемая гребным винтом.

Если $\sigma \geq 2$, то установка направляющей насадки будет целесообразна. Она повысит КПД движительного комплекса, что приведет к возрастанию скорости или тяги.

6. Прежде чем выбрать расчетную диаграмму, необходимо установить число лопастей и дисковое отношение. Для одновинтовых судов число лопастей должно быть не менее 4, что связано с предотвращением недопустимой вибрации, а для двухвинтовых – 3 или 4. Если

коэффициент упора $k'_d = D_B v_p \sqrt{\frac{\rho}{P}} \geq 2$, число лопастей принимают

равным 3, а если $k'_d = D_B v_p \sqrt{\frac{\rho}{P}} < 2$, то 4.

При выборе дискового отношения θ ($\theta = \frac{A_l}{A_d} = \frac{A}{A_d} = 0,3 \dots 1,2$, где

A_d – площадь диска или площадь круга, диаметр которого равен

диаметру винта; z – число лопастей у данного винта; A_n – спрямленная площадь одной лопасти; A – спрямленная площадь всех лопастей) необходимо исходить из обеспечения прочности лопасти и предотвращения кавитации.

Из условий прочности

$$\theta \geq 0,24 \left(1,08 - \frac{d_0}{D_B} \right) \left(\frac{z}{D_B \delta_{\max}} \right)^{2/3} \sqrt[3]{\frac{10mP}{[\sigma]}}, \quad (12.1)$$

где d_0 – диаметр ступицы;

z – число лопастей;

$\delta_{\max} = 0,08 \div 0,09$ – относительная толщина лопасти при относительном радиусе лопасти $0,6 \div 0,7$;

m – коэффициент учитывающий условия работы винта, равный 2,0 для ледоколов; 1,75 – для судов ледового плавания; 1,5 – для буксиров и толкачей; 1,15 – для транспортных судов;

P – упор винта, кН; $[\delta] = 6 \cdot 10^4$ кПа – допускаемые напряжения для винтов транспортных судов.

Из условий отсутствия кавитации

$$\theta \geq \frac{1,5 + 0,35z}{(p_0 - p_v) D_B^2} + \frac{0,2}{x}, \quad (12.2)$$

где $p_0 = p_{\text{атм}} + \rho g h_b$ – давление в потоке на бесконечности;

$p_{\text{атм}} = 101,3$ кПа атмосферное давление;

ρ – плотность воды;

g – ускорение свободного падения;

h_e – погружение оси винта, принимается по теоретическому чертежу (в курсовом проекте приближенно можно принять половину осадки судна);

$p_v = 2,3$ кПа – давление насыщенных паров.

После расчета дисковых отношений по (12.1) и (12.2) выбирают большее. По нему подбирают расчетную диаграмму с ближайшим большим дисковым отношением, которое принимают окончательным.

7. Дальнейший расчет требуемой мощности и частоты вращения гребного винта производим по алгоритму, приведенному в табл. 12.1, по выбранной диаграмме.

Таблица 12.1

Расчет элементов винта при выборе энергетической установки

№ п/п	Расчетная величина, размерность	Численные значения					
		0,6D _в	0,7D _в	0,8D _в	0,9D _в	D _в	1,1D _в
1	Диаметр винта D _в , м						
2	Коэффициент упора $k'_d = D_v v_p \sqrt{\frac{\rho}{P}}$						
3	Относительная поступь λ _р (с расчетной диаграммы)						
4	КПД винта η _р (с расчетной диаграммы)						
5	Шаговое отношение $\frac{H}{D}$ (с расчетной диаграммы)						
6	Пропульсивный КПД $\eta = \frac{1-t}{1-\psi} \eta_p$						
7	Частота вращения $n = \frac{v_p}{\lambda_p D_v}, 1/с$						
8	Расчетная мощность одного главного двигателя $N_v = \frac{Rv}{x\eta\eta_v\eta_{пер}}, кВт$						
9	Мощность одного главного двигателя с запасом 15 % $N_v^* = k_N N_v, кВт,$ k _N – коэффициент запаса мощности						

8. По результатам выполненного расчета строят зависимости $N_B^* = 1,15N_B = f(n)$, $D_B = f(n)$, которые служат для окончательно-го подбора двигателей (рис. 12.1).

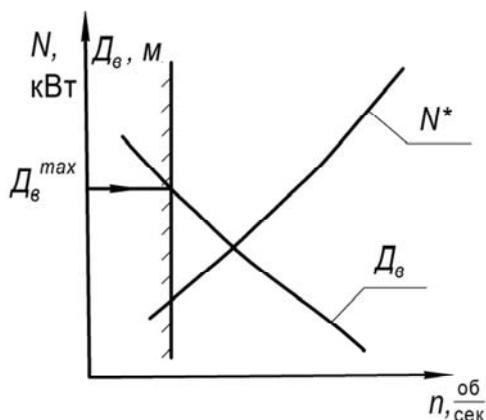


Рис. 12.1. Кривые для выбора двигателя

Двигатель подбирают по каталогам, как ближайший по расчетной мощности и частоте вращения. В табл. 12.4 приведены характеристики некоторых двигателей.

Если соотношение между характеристиками выбранного двигателя (мощностью и частотой вращения гребного винта) не отвечает построенным графикам, приступаем к окончательному расчету гребного винта, который производится по алгоритму табл. 12.2. Если мощность в первом приближении меньше мощности двигателя, переходим ко второму приближению, причем скорость

$$v_2 = v_1 \sqrt[3]{\frac{N_y}{N_{e1}}},$$

где N_y – установочная мощность выбранного двигателя;

N_{y1} – подведенная к винту мощность.

Окончательным считается приближение, когда выполняется условие $N_y \cong N_{e1}$. При этом будут определены оптимальные параметры

винта: диаметр D_v , дисковое отношение θ , шаговое отношение $\frac{H}{D}$, относительная поступь λ_p , число лопастей z .

Таблица 12.2

**Расчет элементов оптимального гребного винта
и достижимой скорости хода**

№ п/п	Расчетная величина, размерность	Численные значения методом последовательных приближений		
		v_1	v_2	$v_3 \dots$
1	Скорость хода, м/с			
2	Расчетная скорость в диске винта $v_p = v(1 - \psi)$, м/с			
3	Коэффициент задания $k_n^n = \frac{v_p}{\sqrt{n}} 4 \sqrt{\frac{75 \rho v_p}{N_p}}$			
4	Относительная поступь λ_p (с расчетной диаграммы)			
5	КПД винта η_p (с расчетной диаграммы)			
6	Шаговое отношение $\frac{H}{D}$ (с расчетной диаграммы)			
7	Диаметр винта $D_v = \frac{v_p}{\lambda_p n}$, м			
8	Пропульсивный КПД $\eta = \frac{1-t}{1-\psi} \eta_p$			
9	Соппротивление движению $R = f(v)$, кН (определяется по кривой сопротивления)			
10	Мощность на валу одного двигателя $N_e = k_N \frac{Rv}{x\eta\eta_v\eta_{пер}}$, кВт $k_N = 1,15$ – коэффициент запаса мощности			

Если найденное значение D_B превышает предельное, то расчет в столбцах табл. 12.2 прекращают и вычисления продолжают по алгоритму в табл. 12.3.

Таблица 12.3

Расчет элементов оптимального гребного винта и достижимой скорости хода при диаметре винта больше предельного

$$\left(D_B > D_B^{\max} \right)$$

№ п/п	Расчетная величина, размерность	Численные значения методом последовательных приближений		
		v_1	v_2	$v_3 \dots$
1	Скорость хода, м/с			
2	Расчетная скорость в диске винта $v_p = v(1 - \psi)$, м/с			
3	Относительная поступь $\lambda_p = \frac{v_p}{nD_B^{\max}}$			
4	Коэффициент момента $k_2 = \frac{N_p}{2\pi\rho n^2 (D_B^{\max})^5}$			
5	КПД винта $\eta_p = f(k_2, \lambda_p)$ (с расчетной диаграммы)			
6	Шаговое отношение $\frac{H}{D}$ (с расчетной диаграммы)			
7	Пропульсивный КПД $\eta = \frac{1-t}{1-\psi} \eta_p$			
8	Сопrotивление движению $R = f(v)$, кН (определяется по кривой сопротивления)			
9	Мощность на валу одного двигателя $N_B = k_N \frac{Rv}{x\eta\eta_B\eta_{пер}}$ $k_N = 1,15$ – коэффициент запаса мощности			

В табл. 12.2, 12.3 расчетная мощность N_p (мощность на гребном винте) определяется

$$N_p = \eta_v \eta_{\text{пер}} N_b (2 - k_N),$$

где η_v – КПД валопровода (среднестатистическое значение 0,98);

$\eta_{\text{пер}}$ – КПД передачи (среднестатистическое значение $0,96 \div 0,97$ – с редуктором; 1 – без редуктора);

N_b – номинальная (эффективная) мощность одного двигателя;

$k_N = 1,15$ – коэффициент запаса мощности.

12.2. Паспортная диаграмма

В результате расчета по приведенной выше схеме, кроме элементов гребного винта, определяются скорость судна, частота вращения гребного вала и мощность главной энергетической установки лишь для одного (расчетного) режима. Для полного суждения о ходовых качествах судна в различных условиях его эксплуатации строят **паспортную диаграмму**, представляющую собой совокупность взаимно согласованных характеристик корпуса, двигателя и гребного винта, построенных в зависимости от скорости судна.

Паспортная диаграмма состоит из двух графиков, расположенных один над другим (рис. 12.2).

По оси абсцисс, общей для обеих частей диаграммы, откладывают скорость судна v , по оси ординат верхней части диаграммы – полезную тягу гребного винта P_e , по оси ординат нижней части – эффективную мощность энергетической установки N_b (или мощность на гребном винте $N_p = \eta_v \eta_{\text{пер}} N_b (2 - k_N)$). Исходными материалами и данными для построения паспортной диаграммы служат расчетные диаграммы $k_1 - \lambda_p$ и $k_2 - \lambda_p$ или кривые действия рассчитанного гребного винта; диаметр и шаговое отношение винта; коэффициенты взаимодействия гребного винта с корпусом ψ , t ; заградительная характеристика двигателя $N_e = f(n)$; КПД валопровода η_v и передачи $\eta_{\text{пер}}$; кривые буксировочного сопротивления $R = f(v)$ – для расчетного режима и различных условий эксплуатации судна (например, глубокая и мелкая вода, движение в битых льдах).

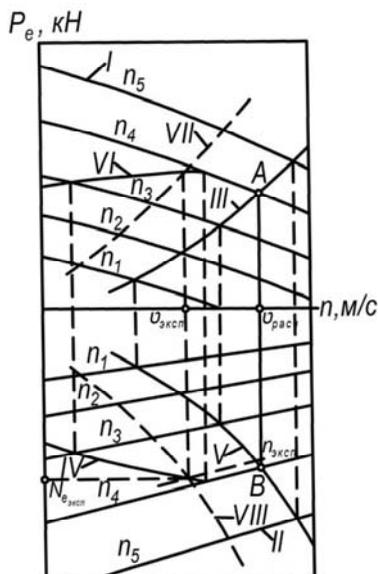


Рис. 12.2. Паспортная диаграмма судна

Паспортные характеристики рассчитывают по формулам, вытекающим из полученных ранее зависимостей:

скорость судна

$$v = \frac{\lambda_p n D_B}{1 - \psi}, \text{ м/с}; \quad (12.3)$$

суммарная тяга винтов

$$P_e = x(1-t)k_1 \rho n^2 D_B^4, \text{ кН}; \quad (12.4)$$

суммарная мощность главных двигателей

$$N_e = \frac{P_e v}{\eta \eta_B \eta_{пер}}. \quad (12.5)$$

Расчет производят в табличной форме (табл. 12.5), задаваясь пятью значениями частоты вращения гребного вала n и пятью значениями относительной поступи λ_p .

Для рассчитанного гребного винта по соответствующей расчетной диаграмме (кривым действия) определяют коэффициенты упора $k_1 = f\left(\lambda_p, \frac{H}{D}\right)$ и расчетный КПД винта $\eta_p = f\left(\lambda_p, \frac{H}{D}\right)$ и заносят их значения в расчетную таблицу 12.5.

Дальнейший расчет производят по формулам, приведенным в таблице. По результатам расчета на диаграмме строят графики зависимостей $P_e = f(v)$ и $N_e = f(v)$ при $n = \text{const}$ (кривые I и II) для всех значений n , принятых в расчетной таблице. Далее на диаграмму наносят расчетную кривую буксировочного сопротивления $R = f(v)$, то есть **кривую требуемой тяги** (III) и ограничительную характеристику двигателя $N_e = f(n)$, то есть **кривую располагаемой мощности** (IV). Переноса по вертикалям, как показано на рис. 12.2, точки пересечения кривой III с кривыми I в нижнюю часть диаграммы на соответствующие кривые II, а точки пересечения кривой IV с кривыми II в верхнюю часть диаграммы на соответствующие кривые I, получают **кривые требуемой мощности V** и **располагаемой тяги VI**. Вертикаль, проведенная через точки **A** (пересечения кривых III и IV) и **B** (пересечения кривых IV и V), определяет на оси абсцисс расчетную скорость судна $v_{\text{расч}}$. Паспортная диаграмма позволяет быстро и наглядно решать все вопросы, относящиеся к ходкости судна в любых эксплуатационных условиях. Например, если нанести на нее любую эксплуатационную кривую требуемой тяги VII и соответственно кривую требуемой мощности VIII, то можно найти отвечающие изменившимся условиям плавания значения $N_{e_{\text{эксп}}}$, $n_{\text{эксп}}$, $v_{\text{эксп}}$.

12.3. Гребные винты в направляющих насадках

Расчет элементов винта целесообразно выполнять по диаграммам модельных испытаний комплекса винт-насадка, приведенных в прил. 2. В этом случае расчетные схемы для винта и комплекса будут одинаковы, если вместо упора P , КПД η_p , расчетной скорости в диске винта v_p , относительной поступи λ_p принимать соответственно P_k , η_B , v_B , λ_B для комплекса. Расчетная скорость для комплекса винт-насадка $v = v(1 - \psi_k)$, где $\psi_k = (0,6 \div 0,7)\psi$.

Упор комплекса для грузовых судов, причем можно принимать $t_k = \psi_k$.

Основные характеристики некоторых дизель-редукторных агрегатов

№ п/п	Тип двигателя	Количество цилиндров	Мощность $P_{дв}$, кВт	Число оборотов на выходе редуктора n , мин ⁻¹	Расход топлива, $\frac{Г}{кВт \cdot ч}$	Габариты двигателя $L \times B \times N$, мм	Масса двигателя, т
1	2	3	4	5	6	7	8
1	MAN	6	1470	252	192	5330 × 1732 × 3186	19
2	L28/32A	6	1470	201	192	5330 × 1732 × 3186	19
3		6	1470	161	192	5330 × 1732 × 3186	19
4		6	1470	141	192	5330 × 1732 × 3186	19
5		7	1715	252	192	5810 × 1732 × 3186	21
6		7	1715	201	192	5810 × 1732 × 3186	21
7		7	1715	161	192	5810 × 1732 × 3186	21
8		7	1715	141	192	5810 × 1732 × 3186	21
9		8	1960	252	192	6290 × 1732 × 3186	23,5
10		8	1960	201	192	6290 × 1732 × 3186	23,5
11		8	1960	161	192	6290 × 1732 × 3186	23,5
12		8	1960	141	192	6290 × 1732 × 3186	23,5
13		9	2205	252	192	6770 × 1844 × 3242	26,5
14		9	2205	201	192	6770 × 1844 × 3242	26,5
15		9	2205	161	192	6770 × 1844 × 3242	26,5
16		9	2205	141	192	6770 × 1844 × 3242	26,5
17	MAN	12	2940	248	193	5560 × 2015 × 3032	27

Продолжение табл. 12.4

1	2	3	4	5	6	7	8
18	V28/32A	12	2940	201	193	5560 × 2015 × 3032	27
19		12	2940	171	193	5560 × 2015 × 3032	27
20		12	2940	151	193	5560 × 2015 × 3032	27
21		16	3920	248	193	6680 × 2015 × 3032	31
22		16	3920	231	193	6680 × 2015 × 3032	31
23		16	3920	191	193	6680 × 2015 × 3032	31
24		16	3920	151	193	6680 × 2015 × 3032	31
25	MAN L23/30A-E	6	800	268	192	3737 × 1628 × 2467	11,5
26		6	800	214	192	3737 × 1628 × 2467	11,5
27		6	800	190	192	3737 × 1628 × 2467	11,5
28		6	800	159	192	3737 × 1628 × 2467	11,5
29	MAN L23/30A	6	960	292	194	3737 × 1628 × 2467	11,5
30		6	960	233	194	3737 × 1628 × 2467	11,5
31		6	960	207	194	3737 × 1628 × 2467	11,5
32		6	960	173	194	3737 × 1628 × 2467	11,5
33		8	1280	292	194	4477 × 1628 × 2467	14,0
34		8	1280	233	194	4477 × 1628 × 2467	14,0
35		8	1280	207	194	4477 × 1628 × 2467	14,0
36		8	1280	173	194	4477 × 1628 × 2467	14,0
37	MAN V23/30A	12	1920	292	195	4670 × 1757 × 2615	17,5
38		12	1920	233	195	4670 × 1757 × 2615	17,5
39		12	1920	187	195	4670 × 1757 × 2615	17,5
40		12	1920	164	195	4670 × 1757 × 2615	17,5

1	2	3	4	5	6	7	8
41	Wartsila 6L170	6	660	270	190	$2895 \times 1312 \times (1226 + 849)$	4,2
42	Wartsila 8L170	8	880	260	190	$3507 \times 1312 \times (1461 + 849)$	5,0
43	Wartsila 12V170	12	1320	250	190	$3065 \times 1589 \times (1470 + 880)$	7,5
44	Wartsila 12V200	12	2400	250	190	$4119 \times 1636 \times (1624 + 990)$	12,6
45	Wartsila 18V200	18	3600	250	190	$4812 \times 1840 \times (1827 + 1023)$	17,5
46	Wartsila 6L20	6	990	290	190	$3123 \times 1360 \times (1612 + 630)$	8,4
47	Wartsila 8L20	8	1320	250	190	$3731 \times 1360 \times (1720 + 630)$	10,5
48	Wartsila 9L20	9	1485	230	190	$4031 \times 1360 \times (1720 + 630)$	12,5
49	Wartsila 6L26	6	1950	220	190	$3660 \times 1804 \times (1918 + 790)$	17,5
50	Wartsila 8L26	8	2600	220	190	$4440 \times 1804 \times (1918 + 790)$	22
51	Wartsila 6L32	6	2760	185	190	$5110 \times 2207 \times (2553 + 1150)$	32
52	Wartsila 9L26	9	2925	180	190	$4830 \times 1804 \times (1918 + 790)$	24,5
53	Wartsila 8L32	8	3680	175	190	$6405 \times 2207 \times (2806 + 1150)$	42
54	Wartsila 12V26	12	3900	180	190	$4000 \times 2375 \times (2012 + 790)$	29
55	Wartsila 6L38	6	3960	180	190	$6069 \times 2073 \times (4178 + 1296)$	50
56	Wartsila 9L32	9	4140	175	190	$6895 \times 2207 \times (2806 + 1150)$	48
57	Wartsila 8L38	8	5280	170	190	$7135 \times 2073 \times (4501 + 1296)$	66

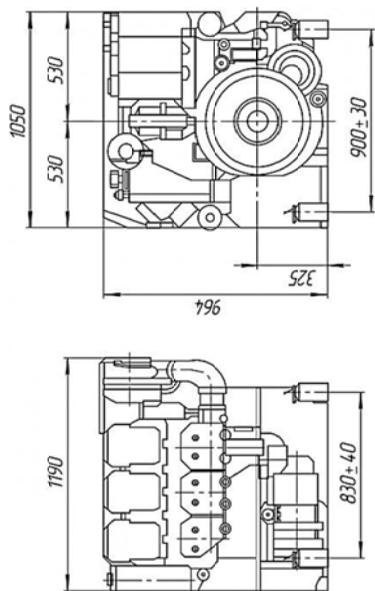


Рис. 12.3. Двигатель фирмы MAN

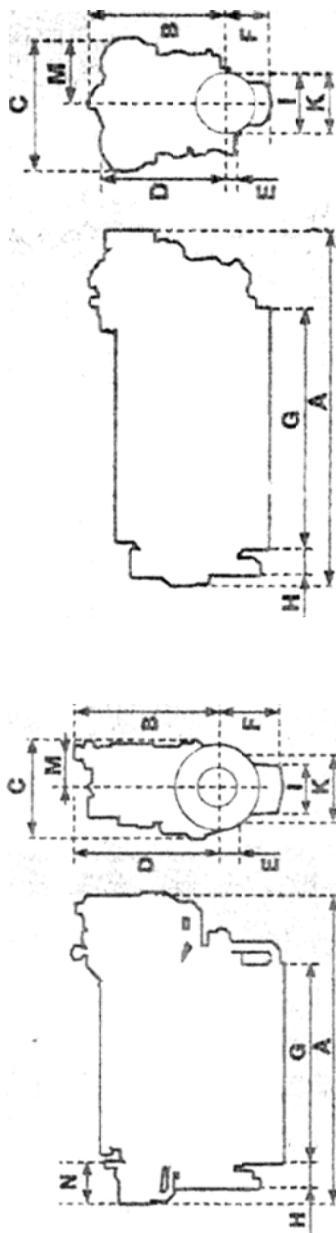


Рис. 12.4. Двигатель фирмы Wärtsilä

Расчет паспортных характеристик

Относительная посылка (выбирается ряд значений)	Расчетные величины, формулы, значения, размерность			Частота вращения, об/с					
	2	3	4	0,6n	0,7n	0,8n	0,9n	n	1,1n
	k_1		$v = \lambda_p n D_B / (1 - \psi)$, м/с						
	η_p		$P_B = x(1-t)k_1 \rho n^2 D^4$, кВт						
	$\eta = \frac{1-t}{1-\psi} \eta_p$		$N_B = \frac{P_B v}{\eta \eta_B \eta_{пер}}$, кВт						
	k_1		$v = \lambda_p n D_B / (1 - \psi)$, м/с						
	η_p		$P_B = x(1-t)k_1 \rho n^2 D^4$, кВт						
	$\eta = \frac{1-t}{1-\psi} \eta_p$		$N_B = \frac{P_B v}{\eta \eta_B \eta_{пер}}$, кВт						
	k_1		$v = \lambda_p n D_B / (1 - \psi)$, м/с						

Окончание табл. 12.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	η_p		$P_B = x(1-t)k_f \rho n^2 D^4$, кН						
	$\eta = \frac{1-t}{1-\psi} \eta_p$		$N_B = \frac{P_B v}{\eta \eta_B \eta_{\text{пер}}}$, кВт						
	k_1		$v = \lambda_p n D_B / (1-\psi)$, м/с						
	η_p		$P_B = x(1-t)k_f \rho n^2 D^4$, кН						
	$\eta = \frac{1-t}{1-\psi} \eta_p$		$N_B = \frac{P_B v}{\eta \eta_B \eta_{\text{пер}}}$, кВт						
	k_1		$v = \lambda_p n D_B / (1-\psi)$, м/с						
	η_p		$P_B = x(1-t)k_f \rho n^2 D^4$, кН						
	$\eta = \frac{1-t}{1-\psi} \eta_p$		$N_B = \frac{P_B v}{\eta \eta_B \eta_{\text{пер}}}$, кВт						

12.4. Чертеж гребного винта

Наибольшее применение в судостроении получили цельнолитые гребные винты-простые в изготовлении, обладающие меньшей массой и большим КПД по сравнению с винтами со съемными лопастями.

Ступице цельнолитого винта придают такие размеры и форму, чтобы она с кронштейном или яблоком ахтерштевня, обтекателем, рудерпостом и рулем образовывала единый удобообтекаемый комплекс. Отношение среднего диаметра ступицы d_0 к диаметру гребного вала принимают обычно в пределах 1,8–2,0. Внутреннему отверстию ступицы придают конусность с уклоном 1 : 15.

Для передачи вращающего момента от гребного вала к винту ступицу крепят на конусе вала при помощи одной или двух шпонок. Сейчас применяют также бесшпоночную (прессовую) посадку винта на гребной вал.

Упор гребного винта на переднем ходу воспринимается конусом гребного вала, а на заднем ходу – крепительной гайкой. Для уменьшения сопротивления ступицу снабжают обтекателем.

Для гребных винтов транспортных судов обычно применяют форму спрямленной поверхности лопасти, разработанную Троостом. Ее несимметричный саблевидный контур, имеющий небольшое отклонение в сторону, противоположную направлению вращения, способствует уменьшению вибрации корпуса судна.

Исходной величиной, определяющей форму контура, является наибольшая ширина лопасти b_m , расположенная на относительном радиусе $\bar{r} = \frac{r}{R} = 0,6$ (рис. 12.5) и определяемая по формуле, аппроксимирующей оригинальные графики и таблицы Трооста:

$$b_m = \frac{\theta D_B}{\left(0,545 - 0,528 \frac{d_0}{D_B}\right) z}, \quad (12.6)$$

где d_0 – диаметр ступицы;

z – число лопастей;

$$\theta - \theta = \left(\frac{A_E}{A_0}\right)_{\min}.$$

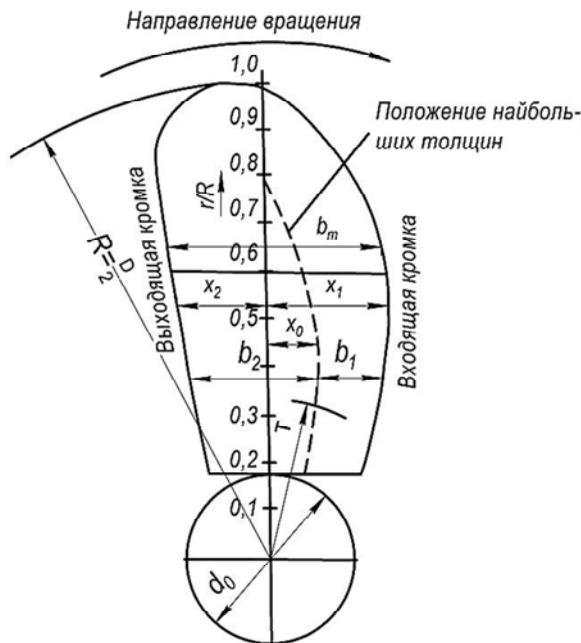


Рис. 12.5. Построение контура спрямленной поверхности лопасти

На чертеже гребного винта изображают его продольный разрез, нормальную проекцию (на плоскость, перпендикулярную оси вращения) и контур спрямленной поверхности лопасти с нанесенными на него профилями сечений. На продольном разрезе показывают боковую проекцию лопасти и ее **медиальное сечение** – условный разрез по линии наибольших толщин.

Для построения медиального сечения лопасти по данным табл. 12.6 выбирают условную относительную толщину лопасти и вычисляют ее абсолютную условную толщину e_0 , которую откладывают на оси винта. Затем проводят образующую лопасти, наклоненную в корму под некоторым углом $6-12^\circ$, величину которого выбирают так, чтобы между концами лопастей и корпусом судна был обеспечен зазор не менее $0,12-0,18 D_E$. Наклон образующей обычно задается на чертеже винта линейным размером m_R на конце лопасти ($m_R = (0,105 \div 0,213) \frac{D}{2}$).

Толщину концевых кромок лопастей e_R принимают согласно Правилам [20] не менее $0,0035D_B$ для судов без ледовых усилений или не менее $0,005D_B$ для судов с ледовыми усилениями. Распределение толщин лопасти между e_0 и e_R принимают по линейному закону (см. рис. 12.6).

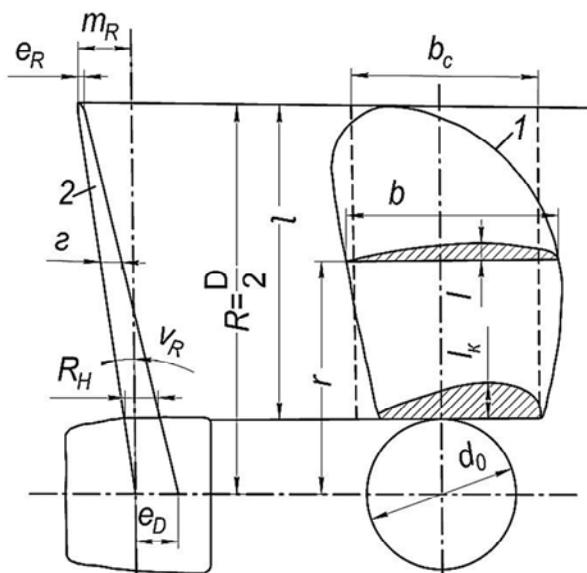


Рис. 12.6. Контур спрямленной поверхности лопасти (1) с сечениями и диаграмма наибольших толщин (2)

Таблица 12.6

Рекомендуемые значения $\bar{e} = \frac{e_0}{D_B}$

Материал	Число лопастей		
	3	4	5
Углеродистая сталь	0,050	0,045	0,040
Нержавеющая сталь или латунь	0,045	0,040	0,035
Бронза	0,041	0,037	0,032

Согласно требованиям на чертеже гребного винта должно быть показано не менее пяти сечений лопасти.

Построение спрямленной поверхности лопасти ведется следующим образом. Проводят ось лопасти и на ней от оси винта O откладывают радиусы сечений r_i , соответствующие относительным радиусам $r/R = 0,3; 0,5; 0,7; 0,8; 0,95$. В отмеченных точках восстанавливают перпендикуляры к оси лопасти, на которых от этой оси откладывают вправо ординаты входящей части лопасти x_1 , влево – выходящей части x_2 и ординаты линии наибольших толщин x_0 : вправо со знаком плюс и влево со знаком минус (см. рис. 12.5). Эти ординаты вычисляют в табличной форме (табл. 12.7), причем наибольшую ширину лопасти b_m определяют по формуле (12.5). Соединив точки входящей и выходящей кромок плавной кривой, получают спрямленную поверхность лопасти. Затем соединяют плавной кривой точки линии наибольших толщин лопасти.

Таблица 12.7

Ординаты для построения спрямленной поверхности лопасти

r/R	r , мм	Выходящая кромка		Линия наибольших толщин		Входящая кромка		Выходящая часть $b_2 = x_2 + x_0$, мм	Входящая часть $b_1 = x_1 - x_0$, мм	Ширина лопасти $b = b_1 + b_2$, мм
		$\frac{x_2}{b_m}, \%$	x_2	$\frac{x_0}{b_m}, \%$	x_0	$\frac{x_1}{b_m}, \%$	x_1			
0,3		33,0		22,5		52,5				
0,5		41,0		22,5		57,8				
0,7		46,5		8,5		51,0				
0,8		48,0		-1,0		41,5				
0,95		40,5		-15,0		12,5				

На расстояниях от оси винта, равных принятым радиусам r_i , строят сечения лопасти. Необходимые для этого величины рассчитывают в табл. 12.8 и 12.9, где y_n и d_n – соответственно подъем и диаметр закругления входящей кромки, t и s – подъем и радиус закругления выходящей кромки, а наибольшая толщина лопасти в данном сечении y_t снимается с боковой проекции (медиального сечения) на этом же радиусе r_i .

Таблица 12.8

Ординаты для расчета входящей кромки лопасти

r/R	b_1 , мм	Наибольшая толщина лопасти y_m , мм	Ординаты сечений в % от длины входящей части лопасти								$\frac{y_n}{y_m}$, %	y_n , мм	$\frac{d_n}{y_m}$, %	d_n , мм
			20		40		60		80					
			$\frac{y}{y_m}$, %	y , мм	$\frac{y}{y_m}$, %	y , мм	$\frac{y}{y_m}$, %	y , мм	$\frac{y}{y_m}$, %	y , мм				
0,3			98,0		93,2		84,7		70,5		36,0		37,8	
0,5			97,6		92,0		81,6		64,0		25,5		29,0	
0,7			97,3		88,4		74,2		52,0		—		22,0	
0,8			96,4		85,6		70,5		48,3		—		20,5	
0,95			95,8		85,0		69,5		48,2		—		20,0	

Таблица 12.9

Ординаты для расчета выходящей кромки лопасти

r/R	b_2 , мм	Наибольшая толщина лопасти y_m , мм	Ординаты сечений в % от длины выходящей части лопасти								$\frac{y}{y_m}$, %	t , мм	$\frac{S}{y_m}$, %	S , мм
			20		40		60		80					
			$\frac{y}{y_m}$, %	y , мм	$\frac{y}{y_m}$, %	y , мм	$\frac{y}{y_m}$, %	y , мм	$\frac{y}{y_m}$, %	y , мм				
0,3			97,0		86,8		71,0		49,4		14,5		13,0	
0,5			96,8		85,6		68,0		43,0		—		12,5	
0,7			96,8		84,9		66,6		41,4		—		14,3	
0,8			97,0		85,4		67,2		43,0		—		15,7	
0,95			97,6		88,0		71,6		48,0		—		18,8	

Для построения боковой и нормальной проекций лопасти из центра винта O откладывают по нормали к осевой линии спрямленной поверхности лопасти отрезок $OP = \frac{H}{2\pi}$ в сторону, противоположную направлению вращения винта (рис. 12.7).

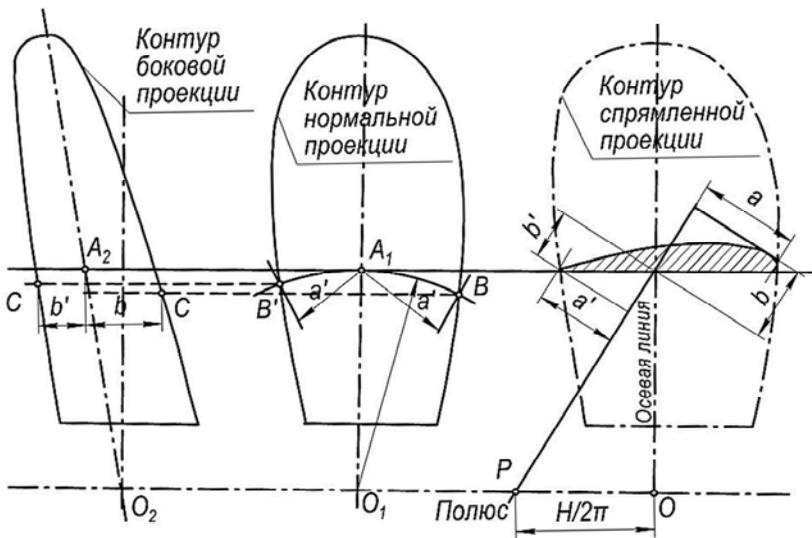


Рис. 12.7. Построение проекций лопасти гребного винта

Из полюса P проводят лучи через точки, подобные точке A , расположенной на осевой линии и на нижней кромке профиля сечения лопасти на радиусе r_i . Затем проводят касательные к профилю перпендикулярно и параллельно лучу PA , в результате чего получают отрезки a, b, a', b' . На нормальной проекции из центра O_1 проводят дугу радиусом r_i , на которой расположено данное сечение лопасти. Из точки A_1 делают засечки радиусами a (вправо) и a' (влево), получая точки B и B' , принадлежащие контуру нормальной проекции лопасти. Для построения контура боковой проекции из точек B и B' проводят горизонталы и на них опускают перпендикуляр из точки A_2 , лежащей на пересечении образующей лопасти с горизонталью, проведенной на радиусе r_i . От этого перпендикуляра вдоль горизонталей откладывают вправо отрезок b и влево отрезок b' . Найденные таким образом точки C и C' принадлежат контуру боковой проекции. Повторяя аналогичные построения для всех принятых значений радиуса r_i , найдем ряд точек и, соединив эти точки плавными кривыми, получим искомые контуры нормальной и боковой проекций лопасти.

Примерный рабочий чертеж гребного винта представлен на рис. 12.8. На чертеже должны быть указаны главные элементы судна и элементы винта: диаметр, шаг, шаговое отношение, число лопастей, дисковое отношение, материал, масса винта, направление его вращения на переднем ходу.

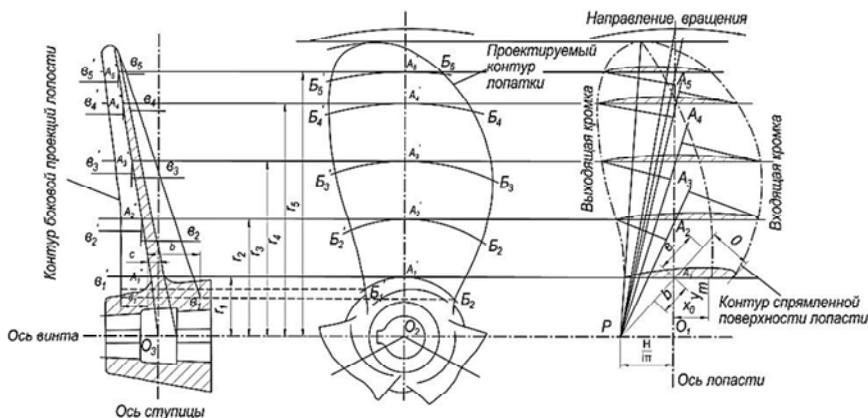


Рис. 12.8. Чертеж гребного винта

13. КАЧКА СУДНА БЕЗ ХОДА, РАСПОЛОЖЕННОГО ЛАГОМ К ВОЛНЕ

Качка судна на волнении описывается дифференциальными уравнениями, решения которых складываются из общих решений, описывающих свободные колебания и частных решений, соответствующих вынужденным колебаниям. Поскольку свободные колебания быстро затухают, обычно рассматривают лишь частные решения.

Основными характеристиками качки на волнении являются амплитуда и фаза. Зависимость амплитуды от частоты возмущающих сил называют *амплитудно-частотной* характеристикой (АЧХ), зависимость фазы от частоты – *фазово-частотной* характеристикой (ФЧХ).

При вычислении АЧХ входное возмущение (волнение) может характеризоваться амплитудой волны (или углом волнового склона – α_0) и частотой.

Одной из задач в проекте судна является построение АЧХ и ФЧХ для регулярного волнения, изменяющегося по гармоническому закону. Без учета горизонтально-поперечных колебаний уравнение бортовых колебаний судна без хода, расположенного лагом к волне, может приближенно описываться «укороченным» уравнением

$$(I_x + \Delta I_x) \ddot{\theta} + N_\theta \dot{\theta} + gDh\theta = Dh\chi\alpha_0 \sin \omega t, \quad (13.1)$$

где I_x – момент инерции массы судна относительно центральной продольной оси, тм^2 ;

ΔI_x – момент инерции присоединенной массы воды относительно той же оси, тм^2 ;

N_θ – сопротивление при бортовой качке, $\text{тм}^2/\text{с}$;

X – редуцированный коэффициент, представляющий отношение амплитуды момента при данной длине волны к амплитуде, соответствующей бесконечно длинной волне;

α_0 – угол волнового склона, рад.;

ω – частота возмущающего момента;

h – метацентрическая высота, м;

$\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$ – угол крена, угловая скорость и угловое ускорение при бортовой качке, рад. Остальные обозначения соответствуют принятым ранее.

Для морских судов с обычными обводами демпфирующая и инерционная компоненты при бортовой качке невелики. Их влияние в области дорезонансных и резонансных частот незначительно и становится заметным только при высоких частотах. Поэтому при решении многих задач бортовой качки пользуются укороченным уравнением в абсолютных координатах. Уравнение (13.1) записывается так

$$\ddot{\theta} + 2\gamma_\theta \dot{\theta} + \lambda_\theta^2 \theta = \lambda_\theta^2 \theta \chi \alpha_0 \sin \omega t, \quad (13.2)$$

где $2\gamma_\theta = \frac{N_\theta}{I_x + \Delta I_x}$ – коэффициент затухания;

$\lambda_\theta = \sqrt{\frac{gDh}{I_x + \Delta I_x}}$ – частота собственных бортовых колебаний судна.

Частное решение уравнения (13.2) имеет вид

$$\theta = \theta_0 \sin(\omega t - \varepsilon_0), \quad (13.3)$$

$$\theta_0 = \frac{\lambda_\theta^2 \chi \alpha_0}{\sqrt{(\lambda_\theta^2 - \omega^2)^2 + 4\gamma_\theta^2 \omega^2}}, \quad \operatorname{tg} \varepsilon_0 = \frac{2\gamma_\theta \omega}{\lambda_\theta^2 - \omega^2}. \quad (13.4)$$

Если разделить все члены выражений (13.4) на частоту собственных колебаний в квадрате h_θ^2 , а амплитуду колебаний θ_0 на угол волнового склона α_0 , получим

$$\frac{\theta_0}{\alpha_0} = \frac{x}{\sqrt{\left(1 - \frac{\sigma^2}{\lambda_\theta^2}\right)^2 + 4\mu_\theta^2 \frac{\sigma^2}{\lambda_\theta^2}}},$$

$$\varepsilon = \operatorname{arctg} \frac{2\gamma\theta}{\lambda_\theta \left(1 - \frac{\omega^2}{\lambda_\theta^2}\right)}.$$

Для определения АЧХ и ФЧХ необходимо располагать параметрами судна и волны. Для их определения используем следующие приближенные зависимости:

момент инерции массы судна (формула Дуайера)

$$I_x = \frac{1}{12} D (B^2 + 4z_g^2);$$

момент инерции присоединенной массы воды определяют из выражения

$$\frac{I_x}{I_x + \Delta I_x} = 0,27 + 0,46 \frac{r_x}{r_s},$$

где r_x – радиус инерции массы судна, $r_x = \sqrt{\frac{I_x}{D}}$;

r_s – среднее плечо смоченной поверхности, $r_s = \frac{1}{4} \alpha B \left(1 + \frac{1}{6} \frac{B}{T} \right)$;

коэффициент затухания $2\gamma_0$ можно принимать по данным Г. Фирсова

$2\gamma_0 = 0,07-0,10$ для судов без скуловых килей,

$2\gamma_0 = 0,11-0,14$ для судов со скуловыми килями;

χ – редуционный коэффициент, предложенный Г. Павленко, разделенный на два сомножителя $\chi = \chi_B \chi_T$. Первый член учитывает влияние ширины судна, полагая осадку малой по сравнению с длиной волны, а второй учитывает влияние осадки, считая ширину судна малой по сравнению с длиной волны. Величины χ_B и χ_T определяются по графикам на рис. 13.1.

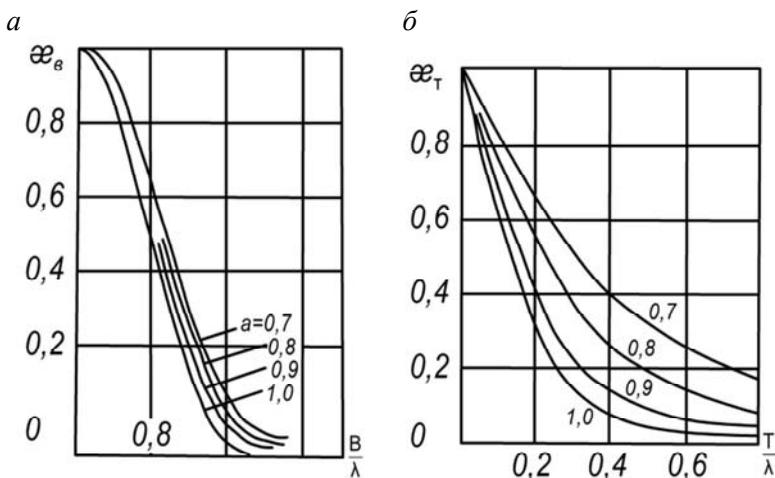


Рис. 13.1. Редуционные коэффициенты

Для определения параметров волн используем эмпирическую связь между высотой и длиной волны (формула Циммермана):

$$h_B = 0,17\lambda_B^{3/4}.$$

Для определенности высоту волны принимают в соответствии с классом судна и ограничением района плавания. В этом случае длина волны λ_B при заданной высоте h_B определяется как

$$\lambda_B = 10,6 h_B^{4/3}. \text{ Угол волнового склона } \alpha_0 = \frac{\pi h_B}{\lambda_B} = \frac{h_B \omega^2}{2g}. \text{ Период вол-}$$

$$\text{ны } \tau = 0,8 \sqrt{\lambda_B}. \text{ Частота волны } \omega = \frac{2\pi}{\tau} = \frac{2\pi}{0,8 \sqrt{\lambda_B}} = \frac{7,85}{\sqrt{\lambda_B}}.$$

По результатам расчета строятся АЧХ и ФЧХ (рис. 13.2, 13.3).

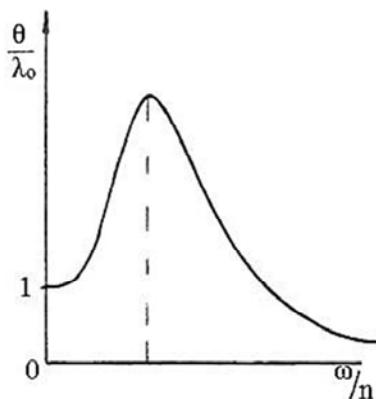


Рис. 13.2. Амплитудно-частотная характеристика

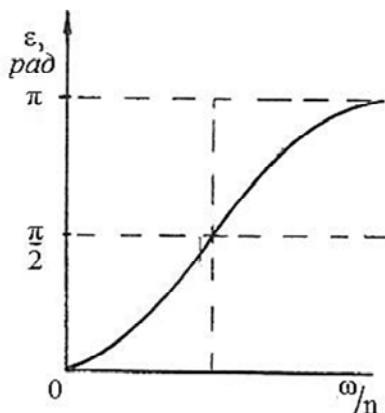


Рис. 13.3. Фазово-частотная характеристика

14. УЧЕТ ЭКОНОМИКИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

14.1. Экономические характеристики, связанные с постройкой и эксплуатацией судна

Задача выбора типа морского транспортного судна относится к числу сложных проблем, поскольку при ее решении должны быть установлены важнейшие эксплуатационно-технические элементы и особенности судна, к числу которых относятся:

1) грузоподъемность и грузоместимость, а для грузопассажирских и пассажирских судов – число перевозимых пассажиров и их деление на классы;

2) скорость хода судна, отвечающая определенным условиям его плавания;

3) необходимый район (дальность) плавания судна в морских милях или в часах его хода с заданной скоростью;

4) тип главных и вспомогательных механизмов и род топлива для них;

5) архитектурный и конструктивный тип корпуса судна, общее расположение его главнейших помещений, число палуб, система набора и род основного материала, идущего на постройку прочного корпуса и надстроек;

6) тип судовых устройств, в том числе грузовых устройств и род палубных вспомогательных механизмов;

7) число и табель комплектации судового экипажа;

8) ограничения, накладываемые на главные размерения судна, если эти ограничения по условиям плавания необходимы;

9) особые требования и пожелания в отношении мореходности, безопасности плавания и оборудования судна, снабжения его специальными устройствами и т. п.

Необходимость создания новых типов торговых судов возникает в результате потребностей обеспечить перевозку пассажиров и грузов в определяемом районе и на определенной линии.

Сравнительный экономико-технический анализ возможных вариантов решения задачи по выбору морского торгового судна имеет целью установить наивыгоднейший тип судна для перевозки грузов, или пассажиров, или того и другого вместе в соответствии с конкретными нуждами страны.

Потребность обеспечить эти нужды лежит в основе постановки задачи создания нового типа торгового судна, которая должна быть решена экономически наиболее целесообразно – при возможно меньшей затрате средств. Вопросы экономики тесно связаны с основными элементами и особенностями судна. Эта связь проявляется в работе торгового судна. При анализе работы грузопассажирских судов перевозку на них установленного числа пассажиров считают эквивалентной перевозке определенного числа тонн груза. Таким образом, грузоподъемность, эквивалентная числу перевозимых на судне пассажиров, условно принимается пропорциональной суммарному объему пассажирских помещений судна, то есть

$$\Delta m_{\text{п}} = m_{\text{гр}} \frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{г}}}, \quad (14.1)$$

где $m_{\text{гр}}$ – чистая грузоподъемность судна в т;

$V_{\text{п}}$ – суммарный объем пассажирских помещений, включая жилые, культурно-бытовые, санитарно-гигиенические и прочие помещения, предназначенные для пассажиров;

$V_{\text{г}}$ – суммарный объем грузовых помещений.

Тогда приведенная полезная грузоподъемность грузопассажирского судна будет равна

$$m_{\text{п}} = \left(1 + \frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{г}}} \right) m_{\text{гр}}. \quad (14.2)$$

Судно является предприятием, которое производит транспортную продукцию, измеряемую в тонно-милях. Элементарным циклом работы торгового судна является его рейс.

Время рейса судна в часах будет может быть представлено в виде

$$t = t_x + t_c, \quad (14.3)$$

где t_x – ходовое время судна в пути в часах;

t_c – стояночное время судна в портах в часах, которое может быть представлено в виде двух слагаемых

$$t_c = t_1 + t_2, \quad (14.4)$$

где t_1 – производственное время, то есть стоянка судна под погрузкой и выгрузкой;

t_2 – время, занятое прочими стоянками судна в портах, к числу которых относятся таможенные досмотры, отсутствие места у причала и т. п. (это время иногда достигает 50 % от стояночного).

Стояночное время судна в портах под погрузкой и разгрузкой и его ходовое время в пути могут быть подсчитаны по выражениям

$$t_1 = 2\eta_p \frac{m_p}{M} \quad (14.5)$$

и

$$t_x = (1+K) \frac{R}{v}, \quad (14.6)$$

где η_p – коэффициент утилизации (использования) грузоподъемности судна он может быть больше единицы – для сыпучих грузов, а также меньше единицы – для генерального груза и равен $\frac{m_g}{m_p}$, где m_g – действительная или полезная грузоподъемность, m_p – расчетная грузоподъемность;

M – норма грузовых работ, то есть нормальное количество груза, погруженного или разгруженного в час.

Эта норма зависит от характера груза, типа судна (числа люков, степени раскрытия палубы); оборудования порта и судна грузовыми устройствами; наличия стивидоров (зав. погрузкой и разгрузкой); их квалификации и т. п. Коэффициент 2 учитывает погрузку и выгрузку; R – дальность плавания в милях; v – номинальная расчетная скорость хода судна в узлах; K – коэффициент удлинения пути судна, учитывающий потерю им скорости хода из-за волнения и приближенно принимается равным 0,1–0,2.

В соответствии с формулами (14.3), (14.4), (14.5) и (14.6) окончательное выражение для времени рейса примет вид

$$t = 2\eta_p \frac{m_p}{M} + (1+K) \frac{R}{v} + t. \quad (14.7)$$

Предположим теперь, что эксплуатационный период судна в году (в течение которого оно работает) составляет z суток (обычно это 80–85 % годового времени). Тогда число рейсов судна в году будет равно

$$n = \frac{24z}{t}. \quad (14.8)$$

Зная число рейсов, можно определить годовую транспортную работу судна или его провозную способность, выражаемую в тонно-милях, по формуле

$$Q = \eta_p n m_p R. \quad (14.9)$$

За один рейс эта транспортная работа будет соответственно равна

$$q = \eta_p PR. \quad (14.10)$$

Итак, годовая транспортная работа судна (провозная способность) является количественным показателем результат его производительной деятельности, которую можно рассматривать как валовую транспортную продукцию судна.

Провозная способность судна, как видно из формулы (14.8) и (14.9), прямо пропорциональна его расчетной грузоподъемности, его эксплуатационному периоду и обратно пропорциональна времени рейса.

Пусть капиталовложения, расходуемые на постройку одного судна, или, иначе говоря, его строительная стоимость вместе с сопряженными затратами (затраты, необходимые для постройки этого судна или серии, в которую оно входит), составляет A рублей. Тогда эффективность использования капиталовложений, или удельных капиталовложений, необходимых для постройки судна, будет

$$a = \frac{A}{Q}. \quad (14.11)$$

Оптимальная эффективность использования капиталовложений будет соответствовать наименьшим возможным значениям a . Чтобы обеспечить это, необходимо каждый раз за счет рациональных технических мероприятий при проектировании добиваться уменьшения необходимых капиталовложений для постройки судна и увеличения его провозной способности.

Положим, что годовые расходы по эксплуатации судна (суммарные эксплуатационные расходы за год) равны S руб. Путем деления этих расходов судна на величину его провозной способности полу-

чим себестоимость перевозки 1 т груза на милю расстояния, или себестоимость 1 тонно-мили:

$$b = \frac{S}{Q}. \quad (14.12)$$

Себестоимость единицы провозной способности торгового судна так же, как и себестоимость продукции промышленного предприятия, является одним из важнейших качественных показателей его работы. Очевидно, что суммарный качественный итог работы торгового судна будет тем выше, чем ниже себестоимость единицы его провозной способности. Поэтому в процессе проектирования судна необходимо проводить различного рода мероприятия для того, чтобы в условиях эксплуатации обеспечить наименьшую величину провозной способности.

Обозначая через R_d доходы и через S расходы при эксплуатации судна за год, можно получить коэффициент рентабельности судна в виде

$$\sigma_p = \frac{R_d - S}{A}, \quad (14.13)$$

который характеризует величину дохода, приносимого судном за время его эксплуатации (отдачу на 1 руб. затраченных денег). Коэффициент рентабельности может быть представлен и в другом виде – через удельные коэффициенты капиталовложения (S), себестоимости перевозки (14.12) и дохода

$$n = \frac{R_d}{Q}, \quad (14.14)$$

или с учетом (14.11)–(14.14) коэффициент σ_p можно посчитать по формуле

$$\sigma_p = \frac{\frac{R_d}{Q} - \frac{S}{Q}}{\frac{A}{Q}} = \frac{n - b}{a}. \quad (14.15)$$

14.2. Способы расчета экономических характеристик в процессе проектирования судна

Строительная стоимость обычно складывается из элементов

$$A = A_{\text{кр}} + A_{\text{мх}} + A_{\text{с}}, \quad (14.16)$$

где $A_{\text{кр}}$ – строительная стоимость в рублях корпуса судна с устройствами и оборудованием;

$A_{\text{мх}}$ – строительная стоимость в рублях судовой силовой установки вместе с пропульсивным оборудованием (двигателями, линиями вала и передачами);

$A_{\text{с}}$ – сопряженные расходы.

Выражение (14.16) можно представить в виде

$$A = A_{\text{мет. кр}} + A_{\text{устр}} + A_{\text{мх}} + A_{\text{с}} \quad (14.17)$$

или

$$A = p_1 m_{\text{кр}} + p_2 m_{\text{мх}} + A_{\text{с}}, \quad (14.18)$$

где p_1 – стоимость 1 т «корпуса»;

p_2 – стоимость 1 т «механизмов».

Стоимость механизмов может быть представлена и в другом виде – через мощность механизмов N :

$$A_{\text{мх}} = rN, \quad (14.19)$$

где r – стоимость (удельная), приходящаяся на 1 л.с.

При выводе формул для определения себестоимости перевозок груза следует прежде всего отметить, что в составе расходов по эксплуатации отечественных морских грузовых судов разных назначений и разной величины наибольшую долю (80–90 %) составляют расходы, зависящие от строительной стоимости судна (отчисления в амортизационный фонд, расходы на текущий ремонт, на снабжение), и расходы на топливо.

В общем случае годовые расходы по эксплуатации судна S складываются из слагаемых

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4, \quad (14.20)$$

где S_1 – годовые эксплуатационные расходы, зависящие от строительной стоимости судна (отчисления в амортизационный фонд, стоимость капитальных и текущих ремонтов, стоимость снабжения);

S_2 – расходы на топливо и смазочные материалы;

S_3 – расходы на содержание экипажа;

S_4 – прочие расходы, включающие в себя навигационные расходы, судовые сборы, а также косвенные расходы, начисляемые в виде определенной доли на прямые расходы по эксплуатации судна (без расходов) на топливо и смазочное масло).

Расходы в выражении (14.20), зависящие от строительной стоимости судна, в свою очередь складываются из следующих элементов.

1. Стоимость отчислений в амортизационный фонд S'_1 , в которую включаются расходы на воспроизводство первоначально авансированного капитала и на капитальный ремонт. В общем виде эти отчисления рассчитывают по выражению (14.21)

$$S'_1 = \frac{A - \Delta A + By}{x}, \quad (14.21)$$

где A – первоначальная стоимость судна (капиталовложения, затраченные на его постройку);

ΔA – стоимость судна, сдаваемого на слом после выхода из эксплуатации, составляющая обычно 10–15 % от A (величина $A - \Delta A$ именуется реновационным фондом, который должен быть восстановлен/погашен равными ежегодными отчислениями в процессе эксплуатации судна);

B – средняя стоимость одного капитального ремонта в рублях, равная примерно 30–40 % от A ;

y – число капитальных ремонтов в течение всего срока эксплуатации судна, продолжительность между которыми в среднем 10–12 лет;

x – планируемый срок эксплуатации судна в годах.

2. S''_1 – расходы на текущий и средний ремонт, которые ежегодно начисляются в сметном порядке по фактической стоимости произведенного ремонта. Текущий ремонт производится ежегодно, а сред-

ний – раз в 4 года. Расходы на текущий и средний ремонт, приходящиеся на 1 год эксплуатации судна, составляют примерно 3 % от A .

3. S_1''' – расходы на снабжение судна материалами и инвентарем, к которым относятся расходы на замену такелажа и торосов, на краску, парусину и т. п. Они составляют примерно 1 % от A .

Расходы на топливо и смазочные материалы S_2 как на стоянке судна, так и на его ходу зависят в основном от стоимости топлива и мощности главных механизмов, а также от отношения между стоячным и ходовым временем.

Расходы на топливо и смазочные материалы можно подсчитать по формуле

$$S_2 = (\rho_x P_{\text{ТХ}} + \rho_c P_{\text{Тс}}) n, \quad (14.22)$$

где $P_{\text{ТХ}}$ – расходы топлива и смазочных материалов на ходу судна за 1 рейс в т;

$P_{\text{Тс}}$ – расходы топлива и смазочных материалов на стоянках судна в портах за 1 рейс в т;

ρ_x и ρ_c – осредненные цены 1 т топлива и смазочных материалов соответственно на ходу и на стоянках в руб.;

n – число рейсов судна в течение годового эксплуатационного периода.

Расход топлива и смазочных материалов на ходу судна за рейс

$$P_{\text{ТХ}} = (1+k) q_{\text{Т}} N \frac{R}{\upsilon} 10^{-3}, \quad (14.23)$$

где $q_{\text{Т}}$ – расход топлива и смазочных материалов на 1 квт·ч в кг;

k – запас мощности главных механизмов для обеспечения заданной скорости в условиях эксплуатации (15–25) %.

После подстановки (14.23) в (14.22) с заменой $n = \frac{24z}{t}$,

$$(1+k) \frac{R}{\upsilon} = t, \quad N = \frac{D^{2/3} \upsilon^3}{c} \quad \text{и введения обозначения} \quad \psi = \frac{1 + \frac{\rho_c P_{\text{Тс}}}{\rho_x P_{\text{ТХ}}}}{1 + \frac{t_c}{t_x}}$$

получим окончательно

$$S_2 = 24\rho_x q_T \Psi z \frac{D^{2/3} v^3}{c} 10^{-3}, \quad (14.24)$$

где t_x – ходовое время;

t_c – стояночное время судна в портах;

c – адмиралтейский коэффициент.

Расходы на содержание экипажа S_3 зависят от численности, которая устанавливается штатным расписанием. В эти расходы входит заработная плата, доплаты, премии, отпускные, отчисления на соцстрах и оплату столового довольствия, а также валютная оплата, при работе на международных линиях.

Прочие расходы S_4 складываются из целого ряда составляющих. К числу их относятся судовые сборы и агентирование. В состав *корабельных сборов* входят корабельный и лоцманский, сборы за производственные услуги (буксировка, перестановка судна с места на место и т. п.). Все сборы взимаются с чистой регистровой вместимости.

В число *судовых сборов* в иностранных портах входят: корабельный, доковый, таможенный, санитарный, полицейский и т. п., которые берутся с чистой регистровой вместимости, а иногда с валовой. Расходы по агентированию включают в себя оплату услуг агентов, которые исчисляются с величины грузоподъемности.

В число общих расходов входят *общие* и *административно-управленческие расходы*, исчисляемые в сметном порядке и включающие в себя затраты как на административно-управленческий аппарат, содержание помещений, так и на исследовательские работы.

К прочим относятся *навигационные расходы* (снабжение судна пресной водой, навигационными инструментами и картами, канцелярскими принадлежностями и т. п.), которые исчисляются пропорционально провозной способности судна.

К этой же группе относятся *стивидорные расходы*, связанные с оплатой погрузочно-разгрузочных работ в иностранных портах. Эти работы выполняются обычно за счет судовладельцев.

Все расходы по содержанию экипажа и прочие расходы могут быть подсчитаны по формуле

$$S_{\text{пр}} = S_3 + S_4 - S_{\text{пр}}^0 \left(\frac{D}{D_0} \right)^{3/4}. \quad (14.25)$$

В (14.25) и последующих формулах данные с индексом 0 относятся к прототипу или к первоначальному варианту проекта, а без индекса 0 – к новому судну или к рассматриваемому варианту проекта.

Итак, рентабельность выражается коэффициентом

$$\sigma_p = \frac{n-b}{a}. \quad (14.26)$$

Поэтому основная задача при проектировании – обеспечение наибольшего коэффициента рентабельности.

Но в процессе проектирования нужно учесть технический прогресс, в результате чего удельная себестоимость перевозки груза $b = \frac{S}{\theta}$

уменьшается, в удельные капиталовложения $a = \frac{A}{\theta}$ возрастают.

Следовательно, при проектировании нужно ставить вопрос о сроке, в течение которого дополнительные затраты окупятся.

Обозначим через $+\Delta a$ увеличение удельного капиталовложения, а через $-\Delta b$ уменьшение удельной себестоимости перевозки груза.

Тогда срок окупаемости дополнительных затрат будет $c_{ок} = \left| \frac{\Delta a}{\Delta b} \right|$,

где берутся абсолютные величины.

Считается выгодным, если срок окупаемости дополнительных затрат меньше 10 лет.

Срок окупаемости дополнительных капиталовложений, необходимых для осуществления соответствующих технически прогрессивных мероприятий, можно подсчитать как

$$c_{ок} = \frac{a - a_0}{b_0 - b}. \quad (14.27)$$

В выражении (14.27) удельные капиталовложения можно подчитать по формуле

$$a = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \left[\frac{A_{кр}^0}{A_0} \frac{p_1}{p_1^0} \frac{p_{кр}}{p_{кр}^0} \frac{v_0}{v} + \frac{A_{мх}^0}{A_0} \frac{p_2}{p_2^0} \frac{q_{мх}}{q_{мх}^0} \frac{\omega}{\omega_0} \right] a_0, \quad (14.28)$$

где A – строительная стоимость судна без сопряженных расходов;

$A_{\text{кр}} = p_1 m_{\text{кр}}$ – стоимость корпуса судна с устройствами и оборудованием;

$m_{\text{кр}}$ – вес корпуса судна с устройствами и оборудованием в т;

p_1 – стоимость 1 т веса корпуса с устройствами и оборудованием;

$p_{\text{кр}} = \frac{m_{\text{кр}}}{D}$ – относительный вес корпуса судна с устройствами

и оборудованием;

D – водоизмещение судна в полном грузу в т;

$A_{\text{мх}} = p_2 m_{\text{мх}}$ – стоимость механической установки;

$m_{\text{мх}}$ – масса механической установки в т;

p_2 – стоимость 1 т массы механической установки;

$q_{\text{мх}} = \frac{P_{\text{мх}}}{N}$ – удельная масса механической установки (масса ме-

ханической установки, отнесенная к 1 л.с.);

N – мощность механической установки в л.с.;

v – скорость хода судна в узлах;

$\omega = \frac{N}{P_{\text{в}}}$ – относительная мощность, представляющая собой от-

ношение мощности энергетической установки судна N к транспортной мощности $P_{\text{в}}$.

Удельная себестоимость перевозки груза может быть подсчитана по аналогичной формуле

$$b = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \left\{ \left[\frac{x A_{\text{кр}}^0}{S_0} \frac{p_1}{p_1^0} \frac{p_{\text{кр}}}{p_{\text{кр}}^0} + \frac{S_{\text{кр}}^0}{S_0} \left(\frac{D}{D_0} \right)^{3/4} \right] \frac{v_0}{v} + \right. \\ \left. + \left[\frac{x A_{\text{мх}}^0}{S_0} \frac{p_2}{p_1^0} \frac{q_{\text{мх}}}{q_{\text{мх}}^0} + \frac{S_{\text{тп}}^0}{S_0} \frac{\rho_x}{\rho_x^0} \frac{\psi}{\psi_0} \frac{q_{\text{тп}}}{q_{\text{тп}}^0} \right] \frac{\omega}{\omega_0} \right\} b_0, \quad (14.29)$$

где $S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 = zA + S_{\text{тп}} + S_{\text{пр}}$ – суммарные эксплуатационные расходы по судну;

$S_1 = xA$ – эксплуатационные расходы, зависящие от строительной стоимости судна;

$S_2 = S_{\text{тп}}$ – расходы на топливо и смазочные материалы;

$S_3 + S_4 = S_{\text{пр}}$ – прочие эксплуатационные расходы (содержание команды, навигационные расходы, судовые сборы и т. п.);

$q_{\text{тп}}$ – удельный расход топлива на ходу (расход топлива, отнесенный к 1 л.с.-ч);

$$\psi = \frac{1 + \frac{\rho_c}{\rho_x} \frac{P_{\text{тп.с}}}{P_{\text{тп.х}}}}{1 + \frac{t_c}{t_x}} - \text{обозначение, принятое при выводе формулы}$$

(14.15);

$P_{\text{тп.х}}$ – расход топлива в т на ходу судна за один рейс;

$P_{\text{тп.с}}$ – расход топлива в т на стоянках;

ρ_x – стоимость 1 т топлива и смазочных материалов, используемых при работе механической установки на стоянках судна в портах;

t_x – ходовое время судна;

t_c – стояночное время судна в портах.

В формулах (14.28) и (14.29) коэффициент ε является коэффициентом утилизации теоретически возможной провозной способности судна и представляет собой произведение из четырех коэффициентов

$$\varepsilon = \eta_p \eta_D \eta_v \eta_r, \quad (14.30)$$

где $\eta_p = \frac{m_D}{P}$ – коэффициент утилизации чистой грузоподъемности судна;

m_P – расчетная или чистая грузоподъемность в т;

m_D – действительная или полезная грузоподъемность в т;

$\eta_D = \frac{m_P}{D}$ – коэффициент утилизации водоизмещения по чистой грузоподъемности;

$\eta_v = \frac{v_D}{v}$ – коэффициент утилизации скорости хода судна, кото-

рый является отношением скорости доставки груза v_D к скорости хода судна на испытании;

$$v_D = \frac{R}{t} = \frac{R}{t_x + t_c} \text{ – скорость доставки груза;}$$

R – дальность плавания в милях;

$$\eta_T = \frac{z}{365} \text{ – коэффициент утилизации эксплуатационного периода}$$

да, представляющий собой отношение эксплуатационного периода к числу дней в году.

Произведение из коэффициента утилизации чистой грузоподъемности судна на коэффициент утилизации скорости хода судна

$$\eta_P \eta_V = \frac{P_D v_D}{P_V} \text{ – это коэффициент утилизации номинальной транс-}$$

портной мощности в условиях эксплуатации судна, отношение действительной транспортной мощности судна к ее номинальному значению.

Помимо себестоимости единицы провозной способности транспортного судна, другим не менее важным показателем, характеризующим качественные особенности его работы, является быстрота, скорость перемещения пассажиров и грузов из одних пунктов в другие. Поэтому в выражениях (14.28) и (14.29) для вычисления удельных капиталовложений и удельной себестоимости, наряду с другими технико-эксплуатационными показателями, участвует и скорость хода судна.

14.3. Определение экономической эффективности транспортного судна

Изменение элементов транспортного судна – его грузоподъемности, скорости хода, архитектуры, конструкции корпуса, мощности главных механизмов, устройств, систем и т. п. – в той или иной степени влияет на эксплуатационные и экономические показатели его работы, а также по-разному сказывается на его различных технических и эксплуатационных характеристиках и, следовательно, на экономических показателях при использовании судна в различных условиях.

Поэтому важнейшей задачей при проектировании транспортных судов является выбор вариантов судов, которые в эксплуатации обеспечивали бы наивысшую экономическую эффективность при оптимальном сочетании технических характеристик.

Экономическая эффективность транспортного судна оценивается показателем проведенных затрат, отнесенных к единице провозной способности, по выражению

$$d = b + \theta a, \quad (14.31)$$

где d – показатель приведенных затрат;

a – удельные капиталовложения;

b – удельная себестоимость перевозки груза;

θ – нормативный коэффициент сравнительной эффективности капитальных затрат (величина, обратная нормативному сроку окупаемости капиталовложений для сооружений транспорта и энергетики, $\theta = 0,1$).

Относительное изменение показателя приведенных затрат можно определить как

$$\frac{\Delta d}{d_0} = \frac{\frac{\Delta b}{b_0} + \theta \frac{a_0}{b_0} \frac{\Delta a}{a_0}}{1 + \theta \frac{a_0}{b_0}}. \quad (14.32)$$

Для вычисления удельных капиталовложений a и удельной себестоимости перевозки груза b , а также их изменений Δa и Δb можно воспользоваться выражениями (14.28) и (14.29).

Учитывая выражения (14.28), (14.29) и (14.30), можно сделать заключение о том, что из всех технико-эксплуатационных показателей транспортного судна самые главные – величины ε и ω , поскольку они в наибольшей степени влияют на величину $\frac{\Delta d}{d_0}$.

Для получения возможно наименьшей величины $\frac{\Delta d}{d_0}$ при проектировании нового судна необходимо всемерно добиваться увеличения коэффициента ε – увеличения коэффициентов $\eta_p, \eta_D, \eta_v, \eta_r$, а также уменьшения относительной мощности ω по сравнению с соответствующими им значениями у прототипа, причем возмож-

ности изменения коэффициентов η_p , η_D , η_v , η_r и величины ω в нужном направлении различны.

Коэффициент η_p можно увеличивать с помощью соответствующих конструктивных мероприятий, к числу которых относятся: повышение грузопместимости судна, устройство удобных грузовых помещений, максимальное раскрытие палуб и т. п. Вместе с тем его величина в большей степени зависит от эксплуатационных факторов, к числу которых следует отнести наличие необходимой партионности соответствующих грузов в портах, частоты и продолжительности балластных пробегов и т. п.

Коэффициент утилизации водоизмещения судна

$$\eta_D = 1 - (p_{кр} + p_{мх} + p_{тп}), \quad (14.33)$$

характеризующий эффективность использования веса судна для транспортных целей, в основном обратно пропорционален $p_{кр}$ – относительному весу корпуса (с включением систем и электрооборудования) и $p_{мх} + p_{тп}$ – относительному весу механической установки и запасов топлива со смазочными материалами.

Так как у грузовых судов обычно $p_{кр} > p_{мх} + p_{тп}$, то для увеличения η_D необходимо, во-первых, стремиться уменьшить $p_{кр}$. Во-первых, основным путем уменьшения веса корпуса судна нужно считать постройку корпуса из новых конструктивных материалов при одновременной рационализации конструкции корпуса и усовершенствовании методики расчета его прочности, направленных на изъятие излишних запасов прочности. Во-вторых, нужно стремиться уменьшать также и $p_{мх} + p_{тп}$ с учетом самых последних достижений в области машиностроения путем использования на судах наиболее совершенной механической установки.

Если коэффициент утилизации скорости хода судна представить в виде

$$\eta_v = \frac{1}{\frac{v}{R} \left(2\eta_p \frac{m_p}{M} + t_2 \right) + (1 + K)},$$

то из нее следует, что η_0 существенно увеличивается при сокращении стояночного времени в портах даже при малых значениях $\frac{v}{R}$, или, иначе говоря, при больших дальностях плавания судна.

Для уменьшения $2\eta_p \frac{m_p}{M} + t_2$ необходимо всемерно увеличивать эффективность грузооборота M путем комплексной механизации и автоматизации грузовых работ и сокращения t . Основным условием наиболее продуктивного осуществления комплексной механизации на сухогрузных судах является максимально возможное раскрытие грузовых помещений с помощью люков больших размеров и устройства самих грузовых помещений, удобных по габаритам и форме для укладки груза.

И.П. Мирошниченко в своих исследованиях, посвященных морским сухогрузным судам открытого типа, установил, что увеличение раскрытия грузовых помещений на сухогрузных судах в 2–2,5 раза позволяет повысить интенсивность грузовых работ в 1,5–2 раза по сравнению с существующей на большинстве современных грузовых судов. Если, кроме того, обеспечить сокращение времени непроизводительных простоев t_2 на 25–30 %, то можно увеличить η_0 примерно на 10–20 %.

Для увеличения коэффициента утилизации эксплуатационного периода необходимо увеличивать продолжительность последнего путем сокращения времени простоев в ремонте.

Для получения возможно наименьшей величины приведенных затрат следует, кроме изложенного выше, стремиться всемерно уменьшать относительную мощность ω . Однако уменьшить ω при росте скорости хода судна с постоянной грузоподъемностью очень трудно, так как для этого потребуется снижать мощность главных механизмов судна за счет уменьшения сопротивления воды и увеличения пропульсивного коэффициента, а у морских транспортных и особенно грузовых судов в этом отношении реальные возможности весьма малы.

Таким образом, для существенного снижения приведенных затрат и повышения эффективности использования транспортных судов с наименьшими возможными расходами необходимо прежде всего увеличивать коэффициенты утилизации водоизмещения η_D , скорости хода η_0 и эксплуатационного периода η_T .

15. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБЩЕГО РАСПОЛОЖЕНИЯ

15.1. Основные принципы расположения помещений различного назначения и технических средств

Общее расположение проектируется на основе выработанных практикой требований к размещению на военном судне различных видов вооружения, боеприпасов и техники, а на транспортном – к размещению перевозимого груза или пассажиров. При этом должны соблюдаться нормы объемов и площадей, необходимых для каждого из судовых помещений. Проектирование общего расположения имеет целью добиться того, чтобы все боевые и технические средства, а также помещения, расположенные в корпусе и надстройках, обеспечивали бы наилучшее выполнение судном поставленных перед ним задач и нормальные условия повседневной эксплуатации его.

Приступая к проектированию общего расположению нужно, во-первых, ясно знать назначение военного или транспортного судна, в связи с этим – состав вооружения и количество боеприпасов, количество и состав перевозимого груза или пассажиров. Во-вторых, должно быть решено, какой тип ЭУ будет использован на судне и где она будет расположена: в корме, средней части судна или займет промежуточное положение. Выбор места ЭУ следует проводить с учетом условий удифферентовки, обитаемости, комфорта для пассажиров и команды, удобства для производства (на грузовых судах) грузовых работ. Для грузовых судов нужно установить количество грузовых отсеков (имея в виду, что оно возрастает с длиной судна и связано с обеспечением необходимой непотопляемости) и количество и размеры грузовых люков.

Результаты проектирования общего расположения фиксируются в соответствующих чертежах. Их разработка является одним из важнейших этапов создания проекта судна. Для исполнения общего расположения следует установить главные размерения судна, выбрать его архитектурный тип и форму обводов.

На чертежах общего расположения фиксируется размещение: на военном судне – вооружения, боеприпасов, боевых постов, боевых и технических средств; на транспортном – грузовых и пассажирских помещений; на военных и транспортных – размещение меха-

низмов, устройств, оборудования, служебных, жилых, санитарных и культурно-бытовых помещений.

В число чертежей общего расположения, как правило, входят продольный разрез (по диаметральной плоскости), горизонтальные сечения по палубам, платформам, трюму, площадкам и мостикам, поперечные сечения, вид сверху, боковой вид, иногда вид с носа и с кормы и силуэт судна.

Проектирование общего расположения – это сложная задача, поскольку при ограниченных размерах необходимо разместить большое количество вооружения и боеприпасов или перевозимого груза и пассажиров, а также механизмы, оборудование. Размещение помещений и оборудования вызывает противоречия, возникающие при стремлении обеспечивать высокую живучесть боевых средств, удобство их боевого использования, удовлетворение требований к обитаемости, ограничению высоты ЦТ судна, удифферентовки и отсутствия крена.

При проектировании общего расположения, так же как и при проектировании судна в целом, часто приходится делать ряд последовательных приближений от простейшего эскиза расположения, учитывающего лишь основные детали (обычно продольный разрез и одна верхняя палуба), до подробнейших чертежей общего расположения (все сечения по палубам и платформам, продольный разрез, поперечные сечения, чертежи отдельных наиболее ответственных отсеков и блоков и т. п.).

15.2. Классификация судовых помещений

На каждом транспортном судне предусматриваются помещения следующих трех категорий: I – для экипажа, II – служебные, III – специальные.

I. Помещения для экипажа предназначены для обеспечения необходимых бытовых условий экипажу судна. В состав их входят:

а) жилые помещения – каюты комсостава, каюты и кубрики команды;

б) общественные – кают-компания и салоны комсостава, столовая и красный уголок команды, библиотека, судовой комитет и т. п.;

в) санитарно-гигиенические – умывальные, бани, души, ванны, туалетные, бассейны для плавания;

г) хозяйственные – канцелярия, камбуз, хлебопекарня, провизионные кладовые, цистерны пресной воды, прачечная, сушильная, кладовые чистого и грязного белья и т. п.;

д) медицинские – амбулатория, лазарет и изолятор.

II. Служебные помещения предназначены для эксплуатации судна. К ним относятся:

а) помещения главных механизмов – машинные и котельные отделения;

б) вспомогательных механизмов – электростанции, насосные отделения, помещения вспомогательных котлов, рулевой машины, лебедок и т. п.;

в) для навигационных запасов – топлива, смазочного масла, питьевой воды для котлов;

г) навигационные помещения – рулевая и штурманская рубки, радиорубка, помещения гирокомпаса, эхолота и т. п.;

д) общесудовые хозяйственные – фонарная, малярная, шкиперная и другие кладовые;

е) балластные цистерны;

ж) цепные ящики;

з) коффердамы;

и) туннель гребного вала.

III. Специальные помещения предназначены для выполнения основного назначения судна по роду своей деятельности. К ним относятся:

а) грузовые помещения – трюмы, твиндеки, диптанки;

б) пассажирские – жилые, общественные, санитарно-гигиенические.

Примерные схемы весьма распространенного размещения всех перечисленных выше помещений на сухогрузных транспортных судах представлены на рис. 15.1 *а* и *б*, где  – помещения для экипажа,  – грузовые,  – служебные.

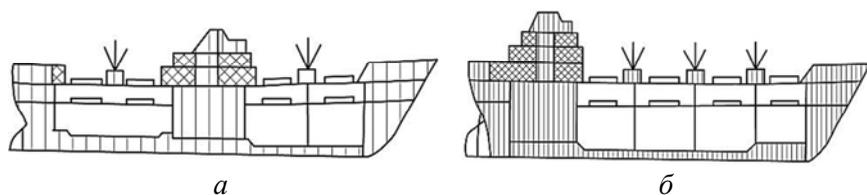


Рис. 15.1. Примерные схемы расположения помещений

Для точного указания местоположения того или иного помещения по высоте необходимо знать названия всех палуб, платформ, мостиков и междупалубных пространств, имеющих на судне (рис. 15.2).

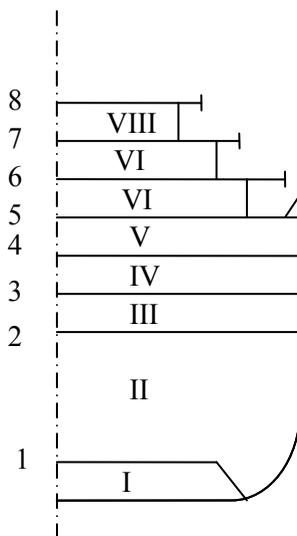


Рис. 15.2. Расположение палуб и междупалубных пространств на грузовом судне:
 1 – настил двойного дна; 2, 3, 4 – верхняя, вторая и третья палубы; 5 – палуба надстройки; 6, 7 – прогулочная и шлюпочная палубы; 8 – палуба мостика;
 I – двойное дно или междудонное пространство; II – трюм; III, IV – нижний и верхний твиндеки; V – надстройка; VI – рубки

Нумерация мостиков после рубок производится снизу вверх (первый, второй и т. д.). Аналогично (снизу вверх) нумеруются и площадки мачт.

Если на судне только две палубы, то они называются верхней и нижней. У двухпалубных шельтердечных судов верхняя открытая палуба называется навесной или шельтердечной, а вторая – верхней.

На военных судах все помещения делятся на три раздела:

I – помещения управления военным судном;

II – помещение боевых частей и служб;

III – общесудовые помещения.

К общесудовым относятся жилые, культурно-просветительные, служебные и хозяйственные, санитарно-бытовые помещения, помещения дежурно-караульной службы, отсеки, цистерны и выгородки.

Помещения управления военным судном обычно составляют не более 2 % от общей вместимости судна; помещения боевых частей и служб – до 55–60 %; общесудовые – до 40–45 %.

Помещения электромеханической боевой части занимают около одной трети всей вместимости судна вместе с надстройками, примерно столько же – помещения жилые и зависящие от комплектации. Отсеки, цистерны и выгородки составляют 10–15 % от полного объема; помещения, предназначенные непосредственно для боевой деятельности – всего 13–17 % от полной вместимости.

15.3. Расположение на судах помещений экипажа

В данном и двух последующих параграфах приводятся основные принципы расположения помещений на судах.

Для определения объема, состава и расположения на судне помещений экипажа необходимо, прежде всего, установить численную комплектацию экипажа. Ориентировочные расчеты численности экипажа проектируемого судна можно сделать по следующим формулам и зависимостям, составленным А.В. Бронниковым с учетом норм ММФ:

$$n = A + B, \quad (15.1)$$

где $A = a + c + bDW + dN$ и $B = f(A)$. (15.2)

где в формулах (15.1, 15.2) DW – дедвейт судна в тыс. т.;

N – мощность силовой установки в тыс. л.с.;

a , b , c и d – численные коэффициенты, значения которых приведены ниже, в табл. 15.1, 15.2, а соотношения между величинами a и b в табл. 15.3.

Таблица 15.1

Численные значения величин a и b

Величины	Дедвейт, т		
	до 1500	1500–6000	более 6000
a	8	15	19
b	4,6	0,9	0

Таблица 15.2

Численные значения величин c и d

Величины	Мощность силовой установки, л.с.		
	до 2000	2000–8000	более 8000
c	9	15	21
d	3	1	0

Таблица 15.3

Соотношения между величинами A и B

A	6–10	11–15	16–22	23–28	29–40
B	1	2	3	4	5

Так, формулы (15.1), (15.2) применимы к дизельным судам, а также к пароходам и турбоходам с котлами на жидком топливе. Количество экипажа на судах с электродвижением увеличивается на 3–6 человек.

Если мощность механизмов судна еще не установлена, то приближенное количество экипажа можно определить по зависимости

$$n = K + kW, \quad (15.3)$$

где DW – дедвейт судна в тыс. т, а значения K и k приведены в табл. 15.4.

Значения коэффициентов K и k , входящих в формулу (15.20)

Величины	Дедвейт, т		
	до 1000	2000–6000	более 6000
K	20	35	43
k	7,5	2,0	0,3

Численность комсостава (старшего и среднего) составляет 26–30 % от общего количества экипажа, полученного по формулам (15.2) и (15.3), причем меньший процент относится к более крупным судам.

Внедрение автоматики на судах должно приводить к снижению норм комплектации экипажа.

Для размещения экипажа можно использовать любые помещения на судах, за исключением:

- а) помещений без естественного освещения и без вентиляции;
- б) помещений, расположенных непосредственно над топливными цистернами и котельными отделениями;
- в) помещений, в которых находится не выгороженный шахтой грузовой люк или имеется непосредственный выход (то есть двери или лапы) в другие помещения, где расположены котлы, механизмы, насосы, хранятся запасы топлива, а также в малярную и фонарную;
- г) помещений за переборками форпика в нос и ахтерпика в корму над и под верхней палубой, кроме того случая, когда имеется ют, в котором размещение экипажа не возбраняется.

Экипаж размещается в *каютах*. Капитан, старший помощник и старший механик – в одноместных каютах. Остальной экипаж размещается в каютах от одно- до четырехместных. На малых судах допускаются как исключение шестиместные каюты. Современная тенденция – в размещении всего экипажа в одноместных каютах.

Минимально допустимая высота жилых помещений составляет 2,0 м. Рекомендуемая нормальная высота кают равна 2,3 м.

Минимально допустимая площадь кают, измеряемая по палубе между обшивкой борта и переборками, зависит от регистрационного тоннажа и не должна быть ниже 3,5 м² для одноместных, ниже 4,2 м² для двухместных и ниже 7,4 м² для трех- и четырехместных кают. В шестиместных каютах команды нормируется не площадь, а по-

лезная кубатура, которая не должна быть ниже 4 м^3 на человека. Минимальные проходы в каютах между койками, предметами каютной обстановки и переборками должны быть шириною не менее 0,6 м. При двухъярусном расположении коек нижняя должна находиться по высоте не менее 0,35 м от палубы, а расстояние между нижней и верхней койками и между верхней койкой и подволоком должно быть не менее 0,75 м.

Для приема пищи и коллективного отдыха комсостава на судне устраивается *кают-компания*. На крупных современных судах в кают-компаниях производится только прием пищи, а для отдыха предусматриваются один или два салона. Смежно с кают-компанией или в непосредственной близости от нее устраивается буфетная, а на судах, плавающих в суровых условиях, кроме того, предусматривается гардеробная.

Кают-компания рассчитывается на 100 % пребывания в ней лиц комсостава и как исключение на 70 % с минимальной площадью на 1 место 1 м^2 . Минимальная площадь в салоне на 1 место $1,5 \text{ м}^2$.

Для приема пищи, отдыха и политико-просветительной работы с членами экипажа предусматривается столовая из расчета пребывания в ней 75 % команды с минимальной площадью на 1 место $0,8 \text{ м}^2$. На крупных и среднетоннажных судах в дополнение к столовой устраивается красный уголок, который обычно располагается смежно со столовой и отделяется от нее раздвижными дверями, что позволяет получить одно большое помещение, используемое для общих собраний, лекций киносеансов и концертов. При столовой может быть буфетная. На больших судах предусматривается помещение судкома.

На большинстве современных судов устанавливают отдельные умывальники в каждой каюте. Если же проектируются умывальные общего пользования, то они делятся на мужские и женские и количество их определяется из расчета 5 (максимум 6 человек экипажа на один умывальник). Члены экипажа, пользующиеся умывальниками в каютах, из расчета исключаются. Устройство общих корыт под кранами не допускается.

Ванны, как правило, предусматриваются только для старшего комсостава и устанавливаются в санузлах при каютах. Ванная имеется и в лазарете. Ванны располагаются вдоль судна, чтобы при качке выплескивалось меньше воды.

Души устраивают как для общего пользования (в виде специальных душевых), так и индивидуальные (в санузлах при каютах комсостава). Во всех душевых обязательно предусматривается раздевальная, которая в одноместных и индивидуальных душевых может отделяться водостойкой занавеской, а в остальных случаях – легкой выгородкой.

Для команды устраиваются бани, состоящие из моечной и раздевалки.

Рекомендуется, чтобы на 1 место для мытья в ванной, душевой или бане приходилось не более 6 человек экипажа, а допустимый предел – 8 человек на место. Площадь палубы для ванной 3,6 м² (минимально допустимая 2,8 м²). Рекомендуемые площади на 1 место в моечной бани 2,0 м², в душевой и в раздевалках бани 1,2 м², а минимально допустимые соответственно 1,4 и 0,8 м². При размещении бань и общественных душевых необходимо удалять их от пищевых, медицинских и жилых помещений.

Туалеты устраиваются как для общего пользования, так и при каютах некоторых лиц комсостава (например, у капитана судна). При экипаже свыше 30 человек должен быть отдельный туалет для женщин. Обычно вход в туалет устраивают через умывальные или через специальный тамбур. Проектирование туалетов производится из расчета 6 человек на унитаз с площадью кабины 1,54 м². В крайнем случае допускается 8 человек на унитаз с площадью 0,96 м². В мужских туалетах устанавливаются писсуары из расчета один писсуар на два унитаза. В силу этого в уборных с одним унитазом установка писсуара не обязательна. Воспрещается размещение общих туалетов в непосредственной близости к жилым и медицинским помещениям. Следует стремиться к тому, чтобы туалеты на разных палубах располагались один над другим и над цистерной для сбора фекальных вод во время стоянки судна в портах. Во всяком случае, туалеты не должны быть над жилыми каютами или помещениями для хранения, приготовления и приема пищи.

Блок медицинских помещений состоит из амбулатории, лазарета и изолятора со своими санузлами и медицинской кладовой. Состав помещений и объем зависит от комплектации судна (табл. 15.5).

**Соотношения между комплектациями экипажа
и медицинских помещений**

Количество экипажа	Состав помещений
До 25 человек	Каюта изолятор на 1 койку площадью 5,8 м ²
От 25 до 40 человек	Амбулатория площадью 6 м ² и изолятор на 1 койку с санузлом площадью 6 м ²
От 40 до 80 человек, при продолжительности рейса в один конец более 2 суток	Амбулатория площадью 6 м ² , лазарет на 1 койку с санузлом; изолятор на 1 койку с санузлом, площадью каждый по 6 м ²
Свыше 80 человек	Амбулатория – 6 м ² , лазарет на 2 койки с санузлом – 10 м ² ; изолятор на 1 койку с санузлом 6 м ²

В последнее время на крупных судах стали устраивать открытые плавательные бассейны площадью 15–20 м² и глубиной 2–2,5 м.

На сравнительно крупных судах устраивается судовая канцелярия площадью от 4 до 8 м².

На всех судах обязателен блок пищевых помещений, включающий камбуз, хлебопекарню и посудомоечную.

На крупных судах, совершающих длительные рейсы, в состав камбуза включают еще два помещения – заготовительную и разделочную, а в состав пищевых помещений – отдельную посудомоечную. Состав и размеры блока пищевых помещений зависят от количества экипажа, длительности рейса и состава оборудования.

Ориентировочно можно считать, что на каждого члена экипажа и пассажира приходится в среднем 0,5–0,6 м² площади палубы пищевых помещений, которая увеличивается до 1 м² на судах ледового плавания.

На каждом судне должны быть отдельные кладовые для хранения сухой и мокрой провизии, расходная кладовая суточного запаса провизии и рефрижераторные камеры для скоропортящихся продуктов. Если на судне имеется хлебопекарня, то добавляются кладовые муки и печеного хлеба. Не разрешается размещать провизионные кладовые в непосредственном соседстве с нагретыми судовыми помещениями, а также с туалетом, баней, прачечной, медицинскими

помещениями и устраивать вход в кладовые по соседству со входом в эти помещения. Площадь расходной кладовой колеблется от 3 до 8 м², а площадь остальных кладовых вместе с холодильной установкой зависит от величины, назначения и района плавания судна, составляя в среднем около 1,5 м² на человека.

Емкость цистерн пресной воды должна быть достаточной для хранения ее запасов: из расчета 100 л на человека в сутки, в том числе питьевой – не менее 40 л. При наличии на судне опреснителя запасы воды уменьшаются на 30 %.

Для стирки белья экипажа, а также судового постельного и другого белья должны быть оборудованы прачечная и сушильная. Устраиваются кладовая чистого белья и кладовая грязного белья. Прачечные, как и бани, нельзя размещать рядом с жилыми и пищевыми помещениями.

Прозодежда экипажа хранится в помещении с индивидуальными шкафами или отделениями в шкафах. Для сушки прозодежды устраивается специальная сушильная.

Грузовое судно может принимать не более 12 пассажиров.

Пассажирские каюты на сухогрузных судах проектируют обычно по типу кают среднего комсостава. На этих судах специальных общественных помещений для пассажиров, как правило, не делают, предоставляя в их пользование кают-компанию и салоны комсостава судна. В районе расположения пассажирских кают предусматриваются туалетные и душевые или ванны, а все хозяйственные и медицинские помещения являются общими для пассажиров и экипажа.

Рекомендуемая ширина магистральных коридоров – 1,2 м, а боковых – 0,9 м. Допустимая ширина их соответственно 0,9 и 0,8 м. Все двери открываются, как правила, внутрь помещений. Исключение – двери в общественные помещения, которые должны открываться наружу, чтобы в случае необходимости все присутствующие могли быстро покинуть помещение. Ширина дверей в свету должна быть не менее 0,6 м (рекомендуется 0,65 м). Трапы следует располагать вдоль судна, что уменьшает неудобства пользования ими при бортовой качке; минимальная ширина их 0,7 м (рекомендуется 0,8–1,0 м); наклон 45–50°.

Помещения экипажа и пассажиров располагают в основном в надстройках и рубках, где они занимают большую часть объемов.

Все помещения экипажа и пассажиров стремятся сосредоточить в одной, в крайнем случае, в двух отдельных надстройках для удобства пользования столовыми, банями и т. п. и приближения кают экипажа к рабочим местам. Обычно для этих целей используются средняя надстройка и рубки. Если же их объем недостаточен, то часть помещений (каюты палубной команды или амбулатория и лазарет) переносятся в надстройку юта или кормовую рубку. В нос от средней надстройки экипаж не размещают. Если машинное отделение судна находится в корме, то, как правило, всю команду, машинный комсостав и первого помощника расселяют на юте, а палубный комсостав и радистов – в средней надстройке. Кают-компанию и салоны комсостава, столовую и красный уголок команды располагают в районе соответствующих кают.

При размещении камбузного блока необходимо учитывать удобства доставки пищи в столовую и кают-компанию.

Провизионные кладовые и рефрижераторные камеры размещают так, чтобы обеспечивалась удобная погрузка продовольствия. С этой целью нередко устраивается специальный люк на открытой палубе или лацпорт в борту, снабженный выдвижным грузовым устройством. Чаще всего провизионные кладовые располагаются в твин-деке под верхней палубой.

Прачечную и сушильную устраивают в надстройке или в твин-деке, а иногда выносят в кормовую рубку.

15.4. Расположение на судах служебных помещений

Основную часть служебной площади занимают помещения ЭУ судна. ЭУ судов транспортного флота отличаются большим разнообразием. Используются все основные типы силовых установок от паровых машин до атомных установок включительно. Однако распространенность установок каждого типа неодинакова; различны и перспективы их применения. Суда с паровыми машинами в настоящее время почти не делаются, а постройка судов с атомными силовыми установками пока носит экспериментальный характер.

Основная масса современных транспортных судов (около 98 % по тоннажу и около 95 % по количеству) строится с паротурбинными и дизельными установками. Паровые турбины используются в основном в качестве главных двигателей крупнотоннажных судов, преимущественно в качестве вспомогательных двигателей.

шественно танкеров, а новые сухогрузные суда оборудуются почти исключительно дизелями. Турбо- и дизель-электрические установки используются в тех немногих случаях, когда это диктуется особенностями эксплуатации судна, например при плавании во льдах.

Перспективным двигателем для судовых установок является газовая турбина, совмещающая достоинства дизелей и паровых турбин. Особенно широкое распространение получают газотурбинные установки со свободнопоршневыми генераторами газа (СПГГ), которые по экономичности приближаются к дизельным, отличаясь от них большей приспособленностью к работе на тяжелом топливе; к тому же СПГГ имеют весьма благоприятные показатели по весам и габаритам.

Существенно важным является вопрос о выборе мощности главного двигателя. В практике отечественного судостроения заданная скорость хода, называемая сдаточной (гарантийной), обеспечивается при полной мощности механизмов. В соответствии с этим по найденной буксировочной мощности при принятом полном пропульсивном коэффициенте и подбирается мощность главного двигателя. Но вследствие обрастания корпуса, влияния ветра и волнения, колебаний в степени квалификации команды, износа деталей механизмов в процессе эксплуатации действительная эксплуатационная скорость судна оказывается меньше сдаточной. Часто в зарубежной практике сдаточная скорость обеспечивается при 80–85 % от полной мощности. При этом механическая установка получается тяжелее, но создаются гораздо более благоприятные условия для поддержания средней скорости хода – при длительной эксплуатации судна – на уровне сдаточной и повышается моторесурс.

За очень небольшим исключением все сухогрузные суда строятся одновальными. Объясняется это технико-экономическими соображениями. Двухвальная установка сложнее, пропульсивный коэффициент ее ниже (в основном из-за снижения КПД винта и коэффициента влияния корпуса), она дороже одновальной в постройке и эксплуатации. В силу этого эксплуатационные расходы на двухвальных судах оказываются в среднем на 10 % выше, чем на одновальных. Целесообразны двухвальные установки лишь в случаях постройки судов, отвечающих специальным требованиям к их живучести и маневренности.

Судовая ЭУ обычно размещается в средней части судна, в корме или занимает промежуточное положение, будучи сдвинута несколько в корму от середины судна. При выборе любого варианта размещения исходят, прежде всего, из общесудовых соображений, учитывая в то же время и влияние, оказываемое положением установки на ее габариты, вес и компоновку.

При любом размещении ЭУ необходимо стремиться к тому, чтобы она занимала, возможно, меньший объем, который отнимается у грузовых и пассажирских помещений, и имела бы минимальное количество изолированных отделений для уменьшения численности машинной команды при выполнении всех требований о расстояниях и проходах, необходимых для обслуживания и ремонта механизмов, а также для нормальных условий труда.

Когда выбран тип ЭУ, но неизвестны еще характеристики главного двигателя, суммарную длину отделения ЭУ можно выразить в долях длины судна

$$l_{\text{оэу}} = kL, \quad (15.4)$$

где коэффициент k зависит от длины судна и от типа ЭУ (табл. 15.6).

Таблица 15.6

**Взаимосвязь типа ЭУ, длины судна
и расчетного коэффициента k**

Тип ЭУ	Длина судна L , м	Коэффициент k
Дизель-редукторная с двумя двигателями в средней части	75–150	0,15–0,13
Дизель-редукторная с двумя двигателями в корме	70–100	0,22–0,10
Дизельная с одним двигателем в средней части	80–150	0,18–0,14
Дизельная с одним двигателем в корме	80–150	0,20–0,17
Дизельная с одним двигателем в корме	45–80	0,25–0,20
Дизель-электрическая в корме	75–120	0,20–0,19
Паротурбинная в средней части	125–180	0,16–0,14

Как видим, значения k в формуле (15.21) уменьшаются с увеличением длины судна.

Для установок с газовыми турбинами значение k ниже на 0,02–0,03 соответствующих дизельных установок.

Если мощность силовой установки уточнена и выбран главный двигатель, то можно уточнить и длину отделения ЭУ, выразив ее, как это предлагает А.В. Бронников, через длину главного двигателя

$$l_{\text{оэу}} = a l_{\text{гл. дв}}, \quad (15.5)$$

где $l_{\text{оэу}}$ – расстояние между носовой и кормовой переборками отделения ЭУ на уровне настила двойного дна, без учета топливных диптанков и рецессов упорного подшипника гребного вала;

$l_{\text{гл. дв}}$ – для дизельных установок – длина собственно дизеля, а для паро- и газотурбинных установок – длина турбозубчатого агрегата.

Для ЭУ мощностью более 3–4 тыс. л.с. коэффициент a в формуле (15.4) принимает значение в зависимости от типа установки (табл. 15.7)

Таблица 15.7

**Взаимосвязь типа ЭУ, длины судна
и расчетного коэффициента k**

Тип ЭУ и передачи	Количество главных двигателей	Расположение ЭУ	
		серединное	кормовое
Дизельная, прямая	1	1,25–1,45	1,95–2,05
Дизель-редукционная	$\left\{ \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ 4 \end{array} \right.$	1,75–2,05	–
		1,85–2,10	2,65–3,15
		2,90–3,10	–
Дизель-электрическая	1–5	3,10–3,60	3,50–3,90*
Паротурбинная	1	2,70–3,00	3,80–4,20
Газотурбинная с СПГ	1	2,60–2,80	3,60–3,90

Примечание. Цифры относятся к случаю слитного расположения отделений дизель-генераторов в гребных электродвигателях.

При меньшей мощности установок всех типов, кроме дизель-редукторных, значение коэффициента a в большинстве случаев увеличивается на 30–60 %.

Довольно широкий предел изменения коэффициента a объясняется различиями в компоновке ЭУ (в частности, наличием или отсутствием рецесса для размещения упорного подшипника в валопроводе), взаиморасположением газовой турбины и СПГГ, дизель-генераторов и гребных электродвигателей и т. п.

Судовая электростанция, основными элементами которой являются генераторы с первичными двигателями и главный распределительный щит, располагается, как правило, в пределах машинного отделения: по бортам от главного двигателя или ярусом выше, на платформе. Тип первичного двигателя (дизель, паровая или газовая турбина) обычно соответствует типу силовой установки.

Располагать оси генераторов следует вдоль судна, а главный распределительный щит – поперек, с целью получения лучших условий работы обслуживающего персонала и механизмов при сильной бортовой качке.

На наливных, пассажирских, товарно-пассажирских, ледокольно-транспортных и некоторых других судах предусматривается аварийный агрегат (дизель-генератор), который располагается в помещении, находящемся не ниже палубы переборок, вне шахты машинно-котельного отделения, и имеющем выход на открытую палубу. Мощность аварийного дизель-генератора колеблется от 10 до 25 кВт. Располагается он вместе с распределительным щитом обычно на верхних ярусах рубок в отдельной выгородке площадью 10–15 м².

Для обеспечения общесудовых нужд горячей водой и паром на судах предусматриваются вспомогательные или утилизационные котлы. Паропроизводительность вспомогательной котельной установки определяется зависимостью

$$B = bD, \quad (15.6)$$

где B – паропроизводительность в кг/час;

D – водоизмещение в т;

коэффициент b для большинства сухогрузных судов с электрифицированными вспомогательными и палубными механизмами ко-

леблется в пределах 0,10–0,15. Для небольших судов с водоизмещением менее 2000 т и судов ледового плавания коэффициент b в формуле (15.6) увеличивается до 0,25–0,40.

На судах с дизельным и газотурбинными силовыми установками ставятся как вспомогательные, так и утилизационные котлы. Лучшим решением является установка комбинированных утилизационно-вспомогательных котлов, обеспечивающих потребности в паре и на ходу, и на стоянке.

Утилизационные котлы располагаются обычно в шахте отделения ЭУ, а нередко и в кожухе дымовой трубы; вспомогательные – на платформе отделения ЭУ, иногда – в отдельном отсеке.

Если на судне валопровод проходит через грузовые помещения, то для защиты от возможных повреждений его ограждают водонепроницаемым туннелем, который простирается от кормовой переборки отделения ЭУ до переборки ахтерпика, имея размеры, достаточные для прохода, осмотра и ремонта подшипников и работы по смене отдельных секций валов. Ширина свободного прохода должна быть не менее 0,5 м. Поэтому туннели в среднем имеют ширину 1,5–1,8 м и высоту около 2 м. Для удобства работ по разборке гребного вала и выемке его внутрь корпуса судна кормовую часть туннеля расширяют до бортов. Длина такого рецесса зависит от размеров гребного вала. Обычно по длине рецесс равен 3–8 м, а по высоте превышает туннель (если он низок) на 0,3–0,6 м.

Над отделениями ЭУ устраиваются шахты, выходящие на открытую палубу, где они заканчиваются световыми люками. На большинстве турбинных судов машинную и котельную шахты объединяют в одну, а на дизельных вообще бывает только одна шахта. Через шахты проводятся дымоходы главных и вспомогательных котлов, выхлопные трубопроводы отработанных газов главных и вспомогательных дизелей с искрогасителями и глушителями. В шахтах располагаются утилизационные котлы, котельные и машинные вентиляторы. Размеры шахт должны быть достаточными для выемки частей главных машин, вспомогательных механизмов и котлов. Шахты ЭУ на большинстве судов сужаются в верхних ярусах рубок для увеличения полезной вместимости. Дымоходы котлов, выхлопные трубы дизелей и патрубки машинной вентиляции выводятся из шахты в кожух дымовой трубы, размеры и конструкции которой должны исключать за-

дымление судна, что достигается обычно выбором высоты дымовой трубы по принятому отношению $h : h_2 = 1,75$ (рис. 15.3).

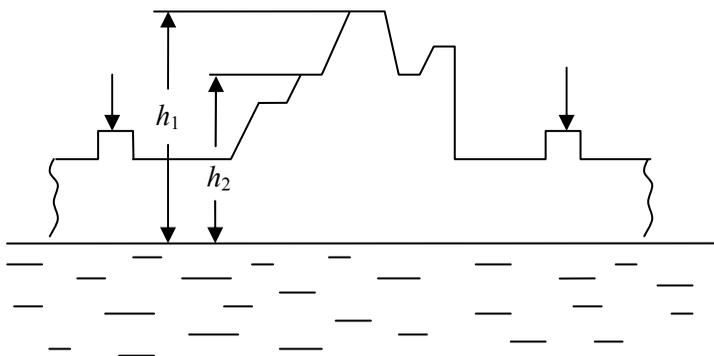


Рис. 15.3. Схема выбора высоты дымовой трубы

Управление ЭУ производится из специальных постов со звуковой изоляцией.

Запасные части, инструмент и расходные материалы хранятся в механической, а на судах с электродвижением – в электротехнической кладовой. Текущий ремонт осуществляется в механической мастерской. Кладовые и мастерская расположены в пределах отделения ЭУ или смежно с шахтой, обычно на нижней палубе или платформе. При изменении мощности силовой установки от 1 500 до 13 000 л.с. меняется и площадь мастерских (в пределах 10–20 м²), а также кладовых (5–25 м²).

Каждое машинное отделение (при наличии и котельное) должно иметь два выхода на главную или вышележащую палубу, по одному с каждого борта, в разных концах отделения, с трапами, расположенными по возможности вдоль судна. Кроме того, каждому машинному и котельному отделению, а также туннелю гребного вала необходим аварийный выход на открытую палубу с минимальным сечением 540 × 540 мм.

Для хранения жидкого топлива, питательной воды и смазочного масла используются цистерны, расположенные, главным образом, в отсеках двойного дна. Часть жидкого котельного топлива, в количестве не менее суточного расхода, должна храниться вне междудон-

ного пространства. Для этой цели устраиваются расходные цистерны соответствующего объема. С эксплуатационной точки зрения целесообразно использовать в качестве топливных цистерн междудонные пространства, прежде всего под машинно-котельными отделениями. Для получения достаточных емкостей двойное дно в этом районе повышается. Условия удифферентовки судна могут заставить разместить часто топливных цистерн в оконечностях, особенно в носовой. При использовании тяжелых сортов топлива должна быть предусмотрена система подогрева нефтепродуктов.

На судах с большими запасами топлива часть его приходится размещать в поперечных диптанках или бортовых продольных цистернах. При таком размещении топлива не только получается необходимая емкость, но и сокращается вредное влияние расходования топлива в рейсе на остойчивость судна. Следует учитывать, что при использовании бортовых цистерн или диптанков для размещения топлива наличие свободных поверхностей топлива в поперечных диптанках может отрицательно отразиться на остойчивости судна, а большие бортовые цистерны после израсходования топлива могут быть причиной аварийного крена. Известно, что порожние бортовые топливные цистерны прослужили одной из причин гибели итальянского лайнера «Андреа Дорина», который при следовании из Америки в Европу в 1956 г. в результате столкновения со шведским лайнером «Стокгольм» опрокинулся и затонул от потери остойчивости.

Важным вопросом, решаемым в процессе проектирования общего расположения, является *балластировка судна*. Прием балласта может производиться с целью как восстановления остойчивости, так и получения необходимой осадки судна в балластном пробеге. Поэтому важно определить количество балласта и предусмотреть соответствующие помещения на судне для приема этого балласта. Что касается количества балласта, принимаемого с целью получения необходимой осадки, то оно определяется в соответствии с выражением

$$m_{\text{бл}} = (0,30 \div 0,35) DW, \quad (15.7)$$

где $m_{\text{бл}}$ – количество балласта в т;
 DW – дедвейт в т.

Количество балласта находится и с помощью коэффициента балластировки $\eta_{\text{бл}} = \frac{m_{\text{бл}}}{D}$, величина которого может быть подсчитана по формуле, предложенной В. Ашиком:

$$\eta_{\text{бл}} = \frac{m_{\text{бл}}}{D} = \eta_D - \frac{\alpha}{\delta} \left(1 - \frac{T_{\text{н}} - T_{\text{к}}}{2T} \right), \quad (15.8)$$

где η_D – коэффициент утилизации водоизмещения по чистой грузоподъемности;

α – коэффициент полноты площади грузовой ватерлинии;

δ – коэффициент общей полноты;

$T_{\text{н}}$, $T_{\text{к}}$, T – осадка носом, кормой и средняя соответственно.

Для приема забортной воды в качестве балласта используются балластные цистерны, форпик, ахтерпик, цистерны судовых запасов и грузовые диптанки. Балластные цистерны располагаются, как правило, в междудонном пространстве, а на отдельных судах – и в других частях корпуса судна. Форпик и ахтерпик на большинстве судов используются также для приема балласта.

Из цистерн судовых запасов для приема балласта употребляют в основном пустые топливные, но это вынужденная мера, поскольку необходимость удаления остатков балластной воды перед приемом топлива вызывает большие затруднения, связанные с невозможностью выброса ее в портах. Диптанки для жидких грузов в широких масштабах используются для приема балластной воды, поскольку в балластном пробеге диптанки пустуют. Такое применение диптанков в значительной мере обеспечивает задачу балластировки судна, повышает возможность достижения желаемой осадки и дифферента без необходимости сильно увеличивать объем чисто балластных цистерн. На некоторых судах (например, рудовозах) с целью уменьшения остойчивости приходится принимать балласт в высоко расположенные балластные цистерны. Поэтому для повышения ЦТ на таких судах устраиваются специальные подпалубные или бортовые балластные цистерны (рис. 15.4), а на некоторых судах они располагаются даже выше верхней палубы.

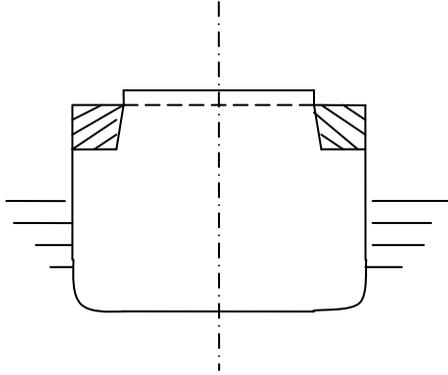


Рис. 15.4. Схема расположение балласта на верхней палубе в судах-рудовозах

15.5. Расположение на судах грузовых помещений

К грузовым помещениям на морских сухогрузных судах относятся грузовые трюмы, твиндеки и диптанки. Трюмы и твиндеки используются для перевозки лишь сухих грузов (как генеральных, так и массовых), а диптанки могут использоваться двояко: или только для жидких грузов (в основном различные растительные масло, реже вино, минеральные масла и другие нефтепродукты), или для жидких и штучных грузов попеременно. В пустые диптанки, как отмечалось, при переходах судна без груза принимается, как пра-вило, жидкий балласт.

При решении вопросов, связанных с назначением размеров, расположением и оборудованием грузовых помещений, необходимо стремиться к тому, чтобы были обеспечены:

- 1) сохранность перевозимых грузов;
- 2) наиболее благоприятные условия для производства погрузочно-разгрузочных операций;
- 3) наиболее полное использование кубатуры грузовых помещений при укладке грузов.

Степень выполнения этих условий влияет на экономические показатели судна.

Деление района грузовых помещений поперечными переборками производится так, чтобы создать наилучшие условия для перевозки грузов и для грузовых работ при соблюдении требований к прочност-ти и непотопляемости проектируемого судна.

Для ускорения грузовых операций с массовыми грузами, особенно при разгрузке, желательно минимальное количество поперечных переборок, то есть наличие длинных трюмов.

Минимальное количество поперечных переборок, лимитируемое прочностью и непотопляемостью судна, регламентировалось Регистром Союза ССР – в зависимости от длины судна l и положения отделения ЭУ.

Количество водонепроницаемых поперечных переборок и число грузовых отсеков в зависимости от длины судна выбирается в соответствии с данными, приведенными в табл. 15.8.

Минимальное количество поперечных переборок, приведенное в табл. 15.8, соответствует требованиям Регистра РФ, за исключением судов с ЭУ в корме, для которых при длине судна свыше 80 м количество переборок не регламентировано. Поэтому приведенное в таблице количество переборок для таких судов можно рассматривать как рекомендуемое, тем более что суда с таким количеством переборок, имеющие класс Регистра РФ, существуют.

Таблица 15.8

**Взаимосвязь количества переборок с длиной судна L
и числом грузовых отсеков**

Длина судна L , м	Количество переборок	Число грузовых отсеков
Для судов с ЭУ по середине длины		
До 80	4	2
От 80 до 100	5	3
От 100 до 120	6	4
От 120 до 140	7	5
От 140 до 160	8	6
От 160 до 180	9	7
Для судов с ЭУ в корме		
До 60	3	1
От 60 до 80	4	2
От 80 до 100	5	3
От 100 до 120	6	4
От 120 до 140	7	5
От 140 до 160	8	6

На всех судах форпиковая переборка располагается на расстоянии 5 % от длины судна L по ГВЛ. Положение всех палуб, платформ, настила двойного дна, а также поперечных переборок как в основном корпусе, так и в надстройках указывается на продольном разрезе судна.

Положение поперечных переборок по длине судна определяется требованиями непотопляемости, однако при этом стремятся получить грузовые отсеки примерно одного объема по длине с тем, чтобы загрузка и разгрузка всех грузовых отсеков заканчивалась одновременно.

Подразделение грузовых помещений по высоте производится исходя из физических свойств грузов, предполагаемых к перевозке, а также способов и средств погрузки, укладки и выгрузки грузов.

Так, для перевозки массовых грузов используются преимущественно однопалубные суда, которые с успехом применимы и под круглый лес, и под пиломатериалы.

Для перевозки штучных грузов, а также для отделения (сепарации) различных грузов используются суда с наибольшим количеством палуб и платформ, то есть универсальные суда. Однако высота их междупалубного пространства должна быть достаточной для установки контейнеров, которые часто перевозятся на универсальных судах, а именно не менее 3,0–3,2 м.

Если предусматривается возможность переоборудования сухогрузных судов в воинские транспорты, подобно тому, как это делают американцы, то в этом случае высота твиндеков на судах, перевозящих войска при четырехъярусном расположении коек, должна быть не менее 2,8 м. Значительное повышение данной цифры нежелательно, так как это противоречит стремлению полностью использовать кубатуры грузовых помещений, а нижняя палуба судов, на которой размещаются люди, должна быть выше грузовой ватерлинии.

В силу сказанного большинство сухогрузных судов универсального назначения – твиндечного типа, однако на линейных судах устраивается часто на одну палубу больше, чем на равных им по размерам трампах, которые большей частью имеют трюм и твиндек, а карголайнеры – трюм и два твиндека.

Рефрижераторные помещения предназначаются для перевозки небольших партий скоропортящихся грузов (в основном на линейных судах). Размеры этих помещений сравнительно невелики:

обычно один или два твиндека, иногда и трюм в пределах одного грузового отсека, а иногда лишь часть одного твиндека. Холодильные установки рефрижераторных помещений размещаются на палубе или платформе над отделением, занятым ЭУ. Поэтому сами рефрижераторные помещения примыкают, как правило, к переборкам отделения ЭУ. Если рефрижераторное помещение располагается в твиндеках, то вход в него – через дверь; если по всей высоте судна, то вход – через люк.

Грузовые диптанки (англ. deep tank – глубокая цистерна) бывают, как отмечалось, для перевозки грузов жидких или штучных. Первые оборудуются лишь необходимой грузовой системой; во вторых устраивается еще и грузовой люк, закрываемый металлической крышкой. Ширина люка 2–3 и длина 2–5 м.

На судах со средним расположением ЭУ диптанки располагаются в трюмах, преимущественно у носовой переборки отделения ЭУ, а также между бортами и туннелем гребного вала, на всей его длине или частично. Иногда диптанк образуют путем подъема настила двойного дна в первом носовом трюме. На судах с ЭУ в корме расположение диптанков определяется, главным образом, условиями балластировки и удифферентовки. Диптанки, простирающиеся от борта до борта, обычно делятся продольными переборками для уменьшения вредного влияния свободных поверхностей находящихся в них жидкостей. Кроме того, диптанки отделяются коффердамами от цистерн для запасов пресной воды. Объем грузовых диптанков составляет 4–6 % от суммарной кубатуры грузовых помещений на судах с ЭУ посередине и 7–9 % на судах с ЭУ в корме.

При выборе размеров, положения и типа грузовых люков следует иметь виду, что каждый вырез грузового люка в верхней палубе судна нарушает или уменьшает прочность, жесткость и герметичность корпуса. С другой стороны, грузовые работы на судне будут производиться тем быстрее, удобнее и дешевле, чем больше грузовые люки, размеры которых установлены в итоге компромиссного решения.

При обычной вертикально-горизонтальной транспортировке грузов с берега на судно и обратно работа портовых кранов должна сочетаться со средствами внутритрюмной механизации при внутритрюмном перемещении груза. Такое сочетание может обеспечить значительное сокращение грузовых работ при выполнении условия, изображенного на рис. 15.5, где операции 1-2-3-4 – рабочий ход

крана; 4-3-2-1 – холостой ход крана; обе последовательности составляют цикл работы крана t_1 . Операции 4-5 относятся к внутритрюмному перемещению t_2 .

Следовательно, значительное сокращение грузовых работ будет получено при условии $t_2 \leq t_1$. В противном случае кран простаивает.

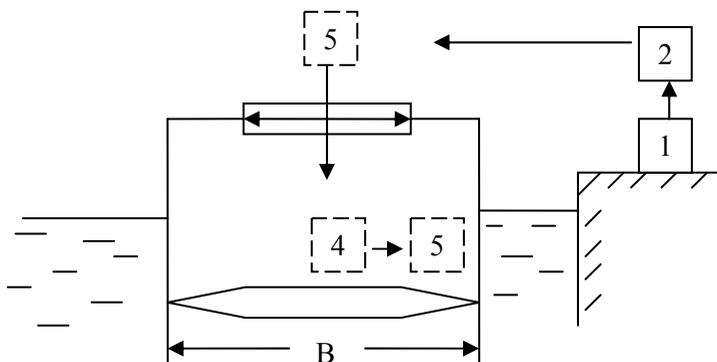


Рис. 15.5. Схема совместной работы портового крана со средствами внутритрюмной механизации при вертикально-горизонтальном перемещении грузов

Степень удобства судна для грузовых работ характеризуется коэффициентом раскрытия палубы K_p , представляющим собой отношение площади люка $S_{\text{л}}$ и площади палубы $S_{\text{п}}$ над данным трюмом или грузовым отсеком

$$K_p = \frac{S_{\text{л}}}{S_{\text{п}}}. \quad (15.9)$$

Действительно численные значения коэффициента K_p показывают приближенно ту долю груза, которая расположена непосредственно под просветами люков и, следовательно, может обрабатываться грузовыми средствами порта или судна без дополнительного перемещения в трюме. Значения коэффициента K_p для современных судов 0,20–0,30, на судах открытого типа они доходят до 0,60. Это означает, что на обычных судах 70–80 % от общего объема перевозимого груза находится под палубами судов, то есть в пределах так называемых подпалубных «карманов» грузовых трюмов, и при по-

грузке его необходимо перемещать с просвета люков к бортам и переборкам, а при выгрузке – в обратном направлении на расстояние до 4–8 м и более (рис. 15.6).

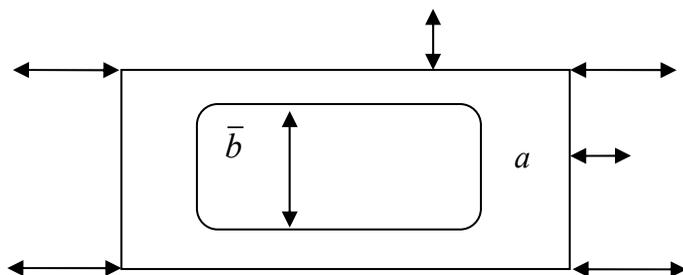


Рис. 15.6. Схема определения оптимальных размеров люков на сухогрузных судах

Ширина люков на большинстве современных сухогрузных судов общего назначения составляет $b = 0,48$, численно 6,5–7,5 м, доходя в отдельных случаях до 9–10 м.

Для сокращения внутритрюмного перемещения желательно, чтобы было

$$a \leq 1,5 \div 2,0, \text{ м}, \quad (15.10)$$

но это практически невозможно, так как крышки будут слишком большими, тяжелыми и неудобными в эксплуатации. Хотя современное закрытие люков осуществляется с помощью металлических крышек, но при таких больших размерах трудно обеспечить их прочность, жесткость и плотность закрытия. Следует отметить, что при выполнении условия (15.10) работы по внутритрюмному перемещению практически становятся минимальными, что привело к созданию судов открытого типа, у которых раскрытие палуб максимальное, что достигается устройством чаще всего парных (рис. 15.7) или тройных люков.

В случае необходимости грузовой отсек может быть разделен на два или три трюма путем постановки продольных переборок, которые привлекаются к обеспечению общей продольной прочности судна.

Грузовые люки на нижней палубе должны быть тех же размеров, что и на верхней, или даже несколько больше.

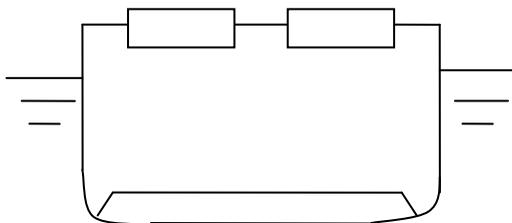


Рис. 15.7. Схема максимального раскрытия палубы путем применения парных люков

Для производства грузовых операций собственными средствами на грузовых судах предусматриваются устройства, основными типами которых являются грузовые стрелы с лебедками и грузовые краны. Последние устанавливаются, главным образом, на судах открытого типа, так как из-за больших грузовых люков на судах этого типа на палубе остается мало свободного пространства для установки грузового устройства.

Устройства с грузовыми стрелами проще и надежнее в эксплуатации, они дешевле и требуют при уходе меньшего внимания, чем краны. Стрелы менее чувствительны к перегрузкам и могут работать при больших углах крена, а повышенная грузоподъемность и увеличенный вылет их достигается проще, чем у крана. Зато краны обладают большей производительностью, они маневренней, так как могут брать груз из любой точки на плоскости, ограниченной минимальными и максимальными радиусами вылета гака. Стрела же берет груз лишь в одном определенном вылете, установленном перед началом работы. Краны занимают меньше места на палубе, чем грузовые стрелы с мачтами и лебедками. Обычно на грузовых судах устанавливаются стрелы грузоподъемностью 3, 5, 7 и 10 т в зависимости от грузоподъемности судна и веса перевозимого груза. Грузоподъемность кранов обычно равна 2, 3 и 5 т. Максимальный вылет кранов (считая от оси вращения) 8–15, минимальный 2,5–5 м. Палубные краны большей грузоподъемности устанавливаются очень редко. Для возможности обрабатывать особо тяжелые индивидуальные грузы устанавливаются стрелы-тяжеловесы.

Многие принципы общего расположения всех помещений, изложенные для сухогрузных судов, остаются в силе и для *нефтеналивных судов (танкеров)*. Однако грузовые помещения здесь носят

особый характер. Танкер предназначен для перевозки жидких грузов, удельный вес которых меньше единицы и для размещения которых предусматриваются не грузовые трюмы и твиндеки, а грузовые танки. Поэтому танкер представляет собой однопалубное судно, как правило, низкобортное, с наличием второго дна в области грузовых танков. Количество поперечных переборок выбирается из условия обеспечения непотопляемости с таким расчетом, чтобы максимальная длина грузовых танков была не более 12 м. С целью уменьшения вредного влияния наличия свободной поверхности жидкого груза на остойчивость и для уменьшения возможных гидродинамических ударов жидкого груза при качке в грузовых танках устанавливаются продольные переборки, делящие грузовые танки по ширине на два или три самостоятельных грузовых танка. Грузовые люки и грузовое устройство на танкерах отсутствуют. Зато на них предусматриваются грузовая система и специальное грузовое насосное отделение для производства погрузки и выгрузки жидкого груза. Насосное отделение еще недавно располагалось в средней по длине судна части, между грузовыми танками, а сейчас оно размещается смежно с отделением ЭУ у его носовой переборки.

Примерное расположение помещений на сухогрузном судне и на танкере представлено на рис. 15.8 и 15.9.

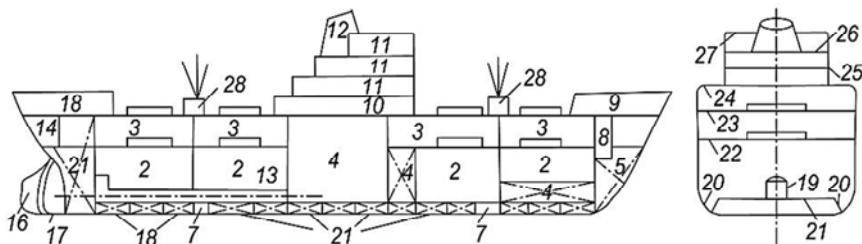


Рис. 15.8. Схема общего расположения помещений на сухогрузном теплоходе:

- 1 – машинное (дизельное) отделение; 2 – грузовые трюмы 1, 2, 3, 4;
- 3 – твиндеки 1, 2, 3, 4; 4 – диптанки; 5 – форпик; 6 – ахтерпик; 7 – коффердам;
- 8 – цепной ящик; 9 – бак; 10 – средняя надстройка; 11 – рубки; 12 – труба;
- 13 – ют; 14 – румпельное отделение; 15 – туннель гребного вала; 16 – руль;
- 17 – винт; 18 – цистерны воды; 19 – топливные цистерны; 20 – льялы;
- 21 – настил двойного дна; 22, 23 – 2-я и верхняя палубы;
- 24 – палуба надстройки; 25, 26 – прогулочная и шлюпочная палубы;
- 27 – палуба мостика; 28 – помещения грузовых лебедок

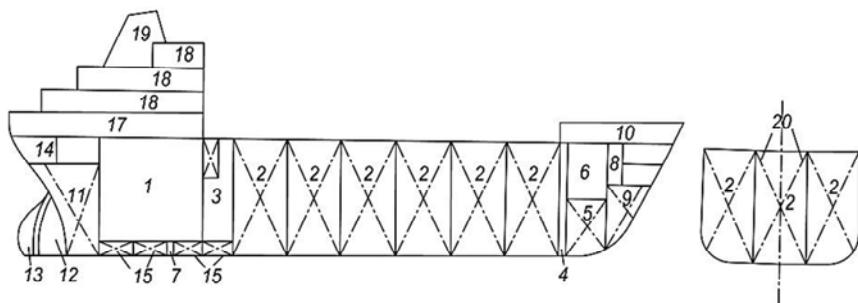


Рис. 15.9. Схема общего расположения помещений на танкере:

- 1 – машинное отделение; 2 – грузовые танки 1, 2, 3, 4, 5, 6; 3 – насосное отделение; 4 – топливный бункер; 5 – диптанк; 6 – сухогрузный трюм; 7 – коффердам; 8 – цепной ящик; 9 – форпик; 10 – бак; 11 – ахтерпик; 12 – винт; 13 – руль; 14 – румпельное отделение; 15 – цистерны воды; 16 – цистерны топлива и масла; 17 – ют; 18 – рубки; 19 – труба; 20 – продольные переборки; 21 – двойное дно

Общие принципы размещения на военном судне общесудовых помещений, механизмов, запасов топлива и т. п. мало чем отличается от размещения на транспортных судах помещений экипажа и служебных помещений. Основное отличие состоит в том, что одним из центральных вопросов проектирования является расположение на транспортных судах – грузовых помещений, а на военных – вооружения с боеприпасом.

ЭУ на военном судне, как правило, располагается под верхней палубой, в средней его части, а топливо – в междудонном пространстве. Вооружение в основном располагается на верхней палубе. С целью увеличения углов обстрела основное оружие на военном судне размещается на носовой и кормовой частях верхней палубы. Как правило, основное оружие ставится по диаметральной плоскости, то есть располагается линейно. При таком расположении главного оружия в средней части военного судна образуется так называемое мертвое пространство, изображенное на рис. 15.10 в виде заштрихованного многоугольника; в пределах этого пространства располагается второй по значимости вид оружия, при размещении которого учитываются радиусы обметания и конусы дульных газов или газовой струи основного оружия.

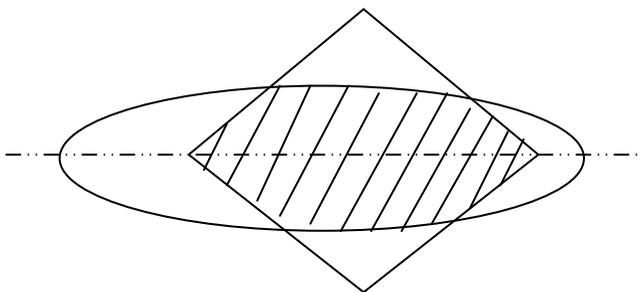


Рис. 15.10. Схема использования площади верхней палубы для размещения оружия на военном судне

Прочее вооружение размещается в местах, отвечающих его наилучшему боевому использованию (например, реактивные бомбометы как в носу, так и в корме). Такое расположение дает возможность стрелять не только по носовым или кормовым, но и по траверсным углам, что позволяет одновременно поражать большую площадь в районе вероятного нахождения подводной лодки противника.

Для размещения боеприпаса обычно используются помещения под верхней палубой и соответствующими установками оружия, для которого боеприпас предназначен, или в непосредственной близости от установок. Весьма важно убедиться в том, что боеприпас можно расположить в суженных оконечностях. Командные пункты и боевые посты располагаются в помещениях под верхней палубой и в закрытых надстройках, по возможности в непосредственной близости к обслуживаемому вооружению или какому-либо объекту боевого или технического средства.

Радио- и радиолокационные антенны и станции располагаются с расчетом обеспечения наилучших условий работы: чтобы они, осуществляя требуемую дальность связи, обнаружения и управления, как можно меньше подвергались при этом действию помех (в том числе и взаимных), горячих газов и т. п. и в то же время обеспечивали необходимые углы обстрела управляемых ими установок вооружения.

15.6. Расположение на судах сигнальных огней

Сигнальными средствами на судах являются сигнально-отличительные огни (фонари), сигнально-проблесковые фонари, сигналь-

ные фигуры, флаги и зеркало, сигнальные пиротехнические и звуковые средства.

На начальных этапах проектирования трудности возникают лишь при размещении сигнальных огней (фонарей), о чем необходимо рассказывать подробнее, имея в виду любые суда длиной 45,75 м и более.

Обязательны к установке на судне следующие огни (фонари). Сигнально-отличительные: топовый – 2, отличительные правого и левого борта по 1, гакобортный – 1, якорный – 2, «не могу управлять» – 2, буксирный – 1 или 2, сигнально-проблесковый стационарный – 1.

На рис. 15.11 изображена схема размещения сигнально-отличительных и сигнально-проблесковых огней с условными обозначениями:

● – стационарные сигнально-отличительные фонари с круговым освещением; ⊗ – поднимаемые сигнально-отличительные фонари с круговым освещением; ◐ – стационарные сигнально-отличительные фонари с секторным освещением; ⊕ – стационарные сигнально-проблесковые фонари.

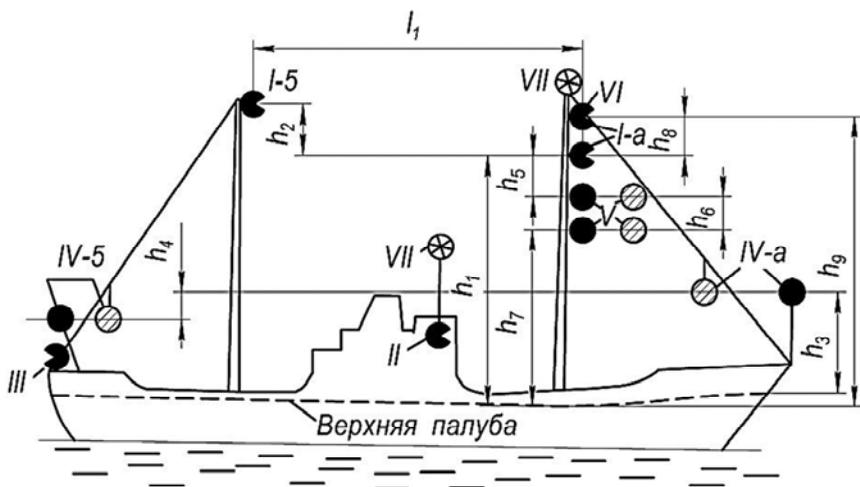


Рис. 15.11. Схема расположения на судне сигнальных огней

I – топовые огни. Передний топовый фонарь *I-а* устанавливается на фок-мачте, а при ее отсутствии – в носовой части судна в диаметральной плоскости (ДП) или плоскости, ей параллельной (по возможности ближе к ДП), на высоте h_1 , не менее 6,1 м над верхней непрерывной палубой судна. Если же ширина судна превышает 6,1 м, то на высоте, равной ширине корпуса судна, но во всех случаях не выше 12,2 м.

Задний топовый фонарь I-б устанавливается на грот-мачте или на иной конструкции в ДП судна или плоскости, ей параллельной (но обязательно в одной плоскости с передним топовым фонарем), на высоте h_2 , превышающей высоту переднего фонаря не менее чем на 4,57 м.

Горизонтальное расстояние между передним и задним топовым огнями l_1 должно быть не меньше трехкратного вертикального расстояния между ними. Чтобы свет от топовых фонарей не ослеплял людей на мостике и палубе бака, под ними должны быть установлены горизонтальные щитки.

II-а и *II-б* – бортовые отличительные огни. Со стороны правого борта устанавливается фонарь с зеленым огнем, со стороны левого – с красным. Располагаются они симметрично относительно ДП судна, на одной линии, перпендикулярной к этой плоскости, и по возможности позади переднего топового огня. Наиболее удобное место для установки бортовых отличительных огней – это крылья ходового мостика.

III – гакобортный огонь, фонарь для которого устанавливается на корме в ДП судна, на рубке юта или планшире гакоборта (леерного ограждения в корме), по возможности – на высоте бортовых отличительных фонарей. В случае необходимости установки дополнительного гакобортного огня, требуемого при прохождении некоторых каналов (например, Кильского) или территориальных вод, такой фонарь может быть установлен выше или ниже гакобортного, при этом рекомендуемое вертикальное расстояние между ними не менее 0,6 м.

IV-а и *IV-б* – якорные огни, фонари для которых устанавливаются в носовой кормовой частях судна. Высота установки носового якорного фонаря над верхней непрерывной палубой h_3 должна быть не менее 6,1 м не более 12,2 м, а кормовой якорный фонарь устанавливается ниже носового на расстоянии h_4 не менее 4,57 м. Якор-

ные фонари устанавливаются как стационарно на специальных стойках, так и с помощью подъемных приспособлений.

V – огни «не могу управлять» используются в случае потери судном способности управляться. Устанавливаются фонари для этих огней ниже переднего топового огня, на расстоянии h_5 не менее 0,6 м, в количестве двух штук, вертикально один над другим, расстояние между ними h_6 не менее 1,83 м. Причем нижний фонарь должен возвышаться над верхней непрерывной палубой на расстоянии h_7 не менее 4,27 м. Устанавливаются эти фонари как стационарно на фок-мачту, так и с помощью подъемного приспособления на фок-мачту или штагкорнак.

VI – буксирные огни зажигаются дополнительно к переднему топовому огню на буксирующем судне; в зависимости от условий эксплуатации – в количестве одного или двух фонарей. Наиболее вероятный случай для обычного сухогрузного судна – это буксировка не более одного судна. В этом случае предписывается иметь лишь один буксирный фонарь, который располагается выше или ниже переднего топового фонаря, на расстоянии h_8 не менее 1,83 м и на одной с ним вертикали, а также на расстоянии h_9 не менее 4,27 м, над верхней непрерывной палубой. Если устанавливается два буксирных огня, то расстояние между ними должно быть не менее 1,83 м.

VII – стационарный сигнально-проблесковый огонь, фонарь для которого имеет в комплекте три лампы (две крайние – белого цвета, средняя – красного) или две (белого и красного цветов). Устанавливается он на клотике фок-мачты или на специальной стойке, располагаемой на верхнем мостике. В последнем случае фонарь должен устанавливаться как можно выше, чтобы свет его был виден по всему горизонту.

Согласно Правилам по предупреждению столкновения судов на море (ППСС) для судов всех назначений обязательно следующее: топовые, габортные и бортовые отличительные огни зажигаются на ходу, отсюда и их общее название – *ходовые*. Буксирный огонь является дополнительным и зажигается лишь в том случае, когда данное судно буксирует другое. Якорные огни зажигаются во время стоянки судна на якорю; «не могу управляться» – в аварийных условиях. Если судно лишено возможности управляться и не имеет хода, то эти огни заменяют собой ходовые. Если же судно лишено возможности управляться, но имеет ход, то в дополнение к огням

«не могу управляться» зажигаются еще бортовые отличительные и газобортный. Сигнально-проблесковым огнем пользуются для подачи световых сигналов.

На судах, имеющих грузовые стрелы, крепящиеся на мачтах, размещение сигнальных огней не вызывает затруднений. На судах, у которых нет грузовых устройств или стрелы заменены кранами и на них для производства грузовых операций мачты не нужна, приходится устанавливать специальную сигнальную мачту или даже две.

Размещение сигнальных огней на судне – очень важный и сложный вопрос, приводящий иногда к изменению уже принятых главных размеров судна, поэтому при выборе последних всегда нужно учитывать требования, связанные с установкой сигнальных огней.

Список рекомендуемой литературы

1. Атлас «Внутренние водные пути РСФСР». – М. : Главводпуть, 1973. – 234 с.
2. Белавин, Н.И. Корабли-ракетоносцы / Н.И. Белавин – М. : Военное изд-во, 1967. – 198 с.
3. Бронников, А.В. Особенности проектирования гражданских судов : учеб. пособие / А.В. Бронников; вып. VII. – Л. : Изд. ЛКИ, 1965. – 270 с.
4. Виноградов, И.В. К вопросу о повышении скорости хода морских грузовых судов / И.В. Виноградов. – Тр. ЦНИИМФ, вып. 45, 1963. – С. 13–18.
5. Вицинский, В.В. Основа проектирования судов внутреннего плавания / В.В. Вицинский, А.П. Страхов. – М. : Судостроение, 1970. – 312 с.
6. Внутренний водный транспорт России / Б.Ф. Новосельцев [и др.]. – М. : Речной транспорт, 2006. – 224 с.
7. Гилмер Т.К. Проектирование современного корабля / Т.К. Гилмер. – Л. : Судостроение, 1991. – 196 с.
8. Малотоннажные и среднетоннажные морские сухогрузные суда Российского и Мирового флота : справочник. – СПб. : ЦНИИМФ, 2004. – 446 с.
9. Ногид, Л.М. Проектирование морских судов / Л.М. Ногид. – Ч. 1. – М. : Судпромгиз, 1964. – 185 с.
10. Ногид, Л.М. Проектирование формы судна и построение теоретического чертежа / Л.М. Ногид. – М. : Судпромгиз, 1962. – 403 с.
11. Ногид, Л.М. Теория проектирования судов / Л.М. Ногид. – М. : Судпромгиз, 1955. – 328 с.
12. Отраслевая нормаль ОН9-414-83. Нагрузка весовая судов гражданского флота и вспомогательных судов ВМФ. – М., 1983. – 224 с.
13. Правила для предупреждения столкновения судов в море (ППСС-1948). – М. : Гидрографическое управление ВМС, 1953. – 168 с.
14. Правила. Российский Речной Регистр: в 5-ти т. – М. : Минтранс, 2008. – Т. 1. – 632 с.

15. Правила классификации и постройки морских судов : в 2-х т. – СПб. : Рос. морской регистр судоходства, 2015. – Т. 1. – 317 с.
16. Регистр Союза ССР. Нормы остойчивости морских и рейдовых судов. – М. : Морской транспорт, 1983. – 341 с.
17. Регистр Союза ССР. Правила обеспечения непотопляемости морских судов. – М. : Морской транспорт, 1982. – 177 с.
18. Регистр Союза ССР. Правила обмера морских судов. – М. : Транспорт, 1984. – 168 с.
19. Регистр Союза ССР. Правила о грузовой марке морских судов. – М. : Изд. Рекламбюро ММФ, 1989. – 67 с.
20. Российский Речной Регистр. Правила : в 4-х т. – М. : «По Волге», 2002. – Т. 1. – 432 с.
21. Справочник по серийным транспортным судам : в 2-х т. – М. : Транспорт, 1973. – Т. 2. – 168 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
1. Задача проектирования судов (ПС) и методы ее решения	7
1.1. Дисциплина «Проектирование судов». Общие сведения	7
1.2. Место дисциплины «ПС» среди судостроительных дисциплин (СД)	8
1.3. Классификация известных и неизвестных элементов (величин) проектируемого судна	9
1.4. Основные взаимосвязи между известными и неизвестными элементами проектируемого судна	10
1.5. Техничко-эксплуатационные характеристики судов	11
2. Анализ данных для расчета водоизмещения судна	13
2.1. Анализ проектных величин. Общие сведения	13
2.2. Выбор судна-прототипа (СП)	15
2.3. Нагрузка масс судна и виды водоизмещения	16
2.3.1. Нагрузка масс судна	16
2.3.2. Виды водоизмещения	18
3. Определение водоизмещения судна в первом приближении	19
3.1. Основные расчетные уравнения	19
3.2. Методика расчета водоизмещения судна D при заданных дедейте либо грузоподъемности	21
3.3. Определение главных размерений (ГР) и коэффициента общей полноты в первом приближении	25
3.4. Частные случаи представления массы корпуса	29
3.5. Модификации уравнения плавучести в алгебраической форме	32
3.6. Уравнение плавучести в дифференциальной форме	34
3.7. Дифференциальное уравнение масс (весов) и особенности его использования при определении неизвестных элементов проектируемого судна. Коэффициент Нормана	38
4. Определение основных элементов судна во втором приближении	43
5. Разработка схемы общего расположения	46
6. Расчет вместимости судна	50

6.1. Классификация грузов. Вместимость и грузовместимость судна. Удельная грузовместимость и удельный погрузочный объем перевозимого груза	50
6.2. Приближенные способы обеспечения грузовместимости при проектировании судна	52
6.3. Коэффициент удифферентовки λ и его влияния на положение ЦТ судна	57
6.4. Оценка факторов, влияющих на удельную вместимость	58
6.5. Эпюра емкости судна.....	60
6.6. Понятие о регистровой вместимости	61
6.7. Обеспечение грузовместимости проектируемого судна	64
7. Обеспечение остойчивости проектируемого судна	68
7.1. Определение начальной метацентрической высоты. Приближенные способы оценки начальной остойчивости.....	69
7.2. Анализ начальной остойчивости при проектировании судна	70
7.2.1. Крен от скопления пассажиров у одного из бортов судна	71
7.2.2. Крен на установившейся циркуляции	72
7.3. Обеспечение остойчивости на больших углах крена	77
7.4. Определение критерия погоды	85
8. Проектирование теоретического чертежа судна	93
8.1. Общие сведения.....	93
8.2. Проектирование строевой по шпангоутам	94
8.3. Построение конструктивной ватерлинии	100
8.4. Проектирование носовых и кормовых обводов судна.....	101
8.5. Построение теоретического чертежа судна	108
8.6. Определение гидростатических элементов	112
8.7. Аффинное перестроение чертежа прототипа	116
8.8. Выбор коэффициента продольной полноты	119
8.9. Выбор коэффициента полноты мидель-шпангоута	120
8.10. Выбор коэффициента общей полноты	122
8.11. Выбор коэффициента полноты грузовой ватерлинии	125
8.12. Выбор относительной длины и отношения длины L к ширине судна B	127
8.13. Обоснование выбора отношения $\frac{B}{T}$	134

8.14. Положение наиболее полного шпангоута и центра величины по длине судна	136
8.15. Обводы носовой и кормовой оконечностей	138
9. Балластировка и удифферентовка судна.	
Высота надводного борта	142
9.1. Определение необходимого количества балласта	142
9.2. Расчет посадки судна	144
9.3. Удифферентовка судна	145
9.4. Проверочный расчет высоты надводного борта судна по правилам грузовой марки	151
10. Обеспечение непотопляемости судна	163
11. Сопротивление среды движения судна	171
12. Проектирование гребных винтов	183
12.1. Расчет гребного винта	183
12.2. Паспортная диаграмма	191
12.3. Гребные винты в направляющих насадках	193
12.4. Чертеж гребного винта	200
13. Качка судна без хода, расположенного лагом к волне	206
14. Учет экономики при проектировании	210
14.1. Экономические характеристики, связанные с постройкой и эксплуатацией судна	210
14.2. Способы расчета экономических характеристик в процессе проектирования судна	216
14.3. Определение экономической эффективности транспортного судна	223
15. Основные принципы проектирования общего расположения	227
15.1. Основные принципы расположения помещений различного назначения и технических средств	227
15.2. Классификация судовых помещений	228
15.3. Расположение на судах помещений экипажа	231
15.4. Расположение на судах служебных помещений	238
15.5. Расположение на судах грузовых помещений	247
15.6. Расположение на судах сигнальных огней	256
Список рекомендуемой литературы	261

Учебное издание

КАЧАНОВ Игорь Владимирович

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СУДОВ

Пособие

для студентов специальности 1-37 03 02
«Кораблестроение и техническая эксплуатация
водного транспорта»

Редактор *Т.В. Мейкшане*

Компьютерная верстка *Н.А. Школьниковой*

Подписано в печать 24.01.2019. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 15,46. Уч.-изд. л. 12,09. Тираж 50. Заказ 791.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.