

**Конспект лекций по  
дисциплине  
ТЕОРИЯ  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДОВ**

## Введение

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

Проектирование современных военных и транспортных судов является большой и сложной задачей в силу огромного количества 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 сложнейшее, каким являются современные суда, предназначено передвигаться по воде и обладает заданными боевыми или экономическими и мореходными качествами, для постройки требует детальных чертежей с выполнением многочисленных и сложных расчетов, которые в комплексе и 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, предъявленным к проектируемому судну. Следовательно, реализован может быть лишь тот проект, который составлен на базе современного состояния техники.

Следует отметить, что фактически только за последние 50–60 лет создана наука, занимающаяся принципами составления проекта судна в целом, и называемая 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 судна 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 ещё и потому, что рассматривает судно как инженерное сооружение в целом, в комплексе.

При создании судна решаются следующие вопросы:

- определение водоизмещения, главных размерений и различных соотношений и коэффициентов;
- установление общего расположения, т. е. расположения вооружения, механизмов, систем и устройств, грузовых, жилых и служебных помещений, командных постов и т. п.;
- составление нагрузки судна и определение положения его центра тяжести (ЦТ);
- определение грузовместимости и вместимости, живучести и боевой защиты военного судна.

Наконец, решаются вопросы создания теоретического чертежа судна.

За проектированием судна остается также последнее и решающее заключение о конструкции, прочности, ходкости, мореходности 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 году, назвал науку, описывающую общие методы и приемы 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*.

Таким образом, научным обобщением практики проектирования, проверенной на опыте боевого использования военных судов и повседневной эксплуатации транспортных судов, является теория проектирования судов, которая, раскрывая объективные закономерности данного творческого процесса, помогает конструкторам-практикам создавать высококачественные проекты судов на базе современных достижений науки, техники, боевого использования и эксплуатации.

Теория проектирования судов изучает проектирование как специфическую форму инженерной деятельности, вскрывает взаимо-

связь теории проектирования с другими кораблестроительными науками – теорией корабля, строительной механикой корабля и т. д., которые, в свою очередь, обеспечивают требования теории проектирования. Теория проектирования судов формирует научное понимание качеств судна в целом и воспитывает стремление обеспечить их высокую степень.

При изложении курса основное внимание уделяется рассмотрению методологических приемов проектирования. Численно конкретные задачи, кроме изложенных в курсе, отражаются в курсовом проектировании.

С учетом вышесказанного основными задачами преподаваемой дисциплины являются:

- получения студентами необходимого объема знаний об уравнениях и методах проектирования судов;
- 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 И МЕТОДЫ ЕЁ РЕШЕНИЯ

## 1.1. Общие сведения о дисциплине

Под *проектированием судов* (ПС) 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 элементов проектируемого судна, начиная первыми приближениями и кончая моментом, когда после необходимых проверочных расчетов и исследований размеры судна и его форма окончательно зафиксированы.

Многочисленные примеры, используемые для определения элементов проектируемого судна, можно отнести к более общим методам, определяющим постановку и решение задачи в целом. К числу этих методов в первую очередь следует отнести:

- метод последовательных приближений (МПП);
- метод вариаций (МВ).

*Метод* (принцип) *последовательных приближений* находит свое отражение в 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 для уточнения принятых ранее допущений.

Присутствие в исходных уравнениях произвольных параметров делает задачу определения элементов проектируемого судна неоднозначной. Вследствие этого в процессе проектирования возникает

необходимость выделения из многочисленных возможных сочетаний элементов судна такого сочетания, которое будет соответствовать наиболее эффективному решению поставленной задачи. Такое 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 метод вариаций не исключают, а дополняют друг друга. Метод вариаций можно применять на заключительных этапах решения задачи, проводимых методом 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 «Проектирование судов» среди судостроительных дисциплин**

Дисциплина «Проектирование судов» пересекается с другими специальными дисциплинами, сохраняя присущий ей научный подход.

«Теория корабля», например, решает задачу о мореходных качествах корабля заданных размеров и формы. Дисциплина «Проектирование судов» решает обратную задачу комплексного характера по установлению размеров и формы судна, которые отвечают заданным исходным данным (мореходным качествам корабля).

Имеются общие моменты проектирования судов и строительной механики корабля (СМК). Основным смежным вопросом является вопрос о влиянии элементов набора судна на вес корпуса.

Корабельная архитектура также находит отражение в ПС, особенно когда решаются вопросы, связанные с выбором архитектурного типа гражданских судов.

Технология судостроения, которой уделяется большое внимание при разработке эскизных и технических проектов на начальной стадии проектирования, также взаимосвязана с ПС. Возможности технологии судостроения особенно необходимо учитывать при проектировании формы судовой поверхности.

Смежными являются вопросы проектирования судов и судовых энергетических установок при выборе типа машинной установки и основных характеристик машинного оборудования. Особенно

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

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, в совокупности выражающие основные качества судна.

Неизвестными элементами (характеристиками) проектируемого судна являются:

1. Водоизмещение:

- в полном грузу в начале рейса;
- в полном грузу в конце рейса;
- порожнем;
- в балласте.

2. Главные размерения:  $L$ ,  $B$ ,  $T$ ,  $H$  и коэффициенты формы корпуса:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$ ,  $\varphi$ ,  $\psi$ .

3. Мощность главных механизмов, запасы топлива, воды, масла.

При проектировании судна важно наметить логическую схему решения задачи, т. е. установить:

- какие элементы заданы;
- какие элементы неизвестны;
- какие имеются допущения;
- какие аналитические зависимости целесообразно использовать при разработке проекта.

Следует отметить, что все многообразные приемы для определения технико-эксплуатационных элементов проектируемого судна в конечном счете сводятся к составлению и решению системы уравнений, связывающей заданные и частично выбранные проектантом тактико-технические и эксплуатационные показатели: авто-

номность, дальность плавания, состав экипажа, вид груза, водоизмещение  $D_w$ , главные размерения судна и коэффициенты, определяющие его форму и конструкцию.

При разработке проекта необходимо обеспечить требования:

условий эксплуатации, т. е. требования в отношении плавучести, остойчивости, непотопляемости, ходкости, качки, прочности, конструкции корпуса;

экономики, т. е. обеспечить народнохозяйственный эффект от постройки и эксплуатации судна;

техники производства, т. е. установить реальные возможности постройки судна;

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:

уравнение плавучести

$$D = \rho \delta LBT;$$

уравнение массы корпуса

$$m_k = p_k LBH;$$

уравнение начальной метacentрической высоты (уравнение остойчивости)

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

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:



- масс

$$D = \sum m_i;$$

- мощности эффективной

$$T_E = \frac{D^{2/3} v^3}{C};$$

- масс механизмов

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

$p_{\text{мх}}$  и  $p_{\text{к}}$  – измерители массы механизмов и корпуса соответственно;

- уравнение массы топлива

$$m_{\text{тп}} = q_{\text{тп}} \frac{N_E R}{v};$$

$$q_{\text{тп}}, \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}.$$

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, нормативов и критериев на практике используют реальные данные близких к данному судну судов-прототипов, т. е. 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 измерений массы корпуса и составлении уравнения нагрузки – другой и т. п.

## 1.5. Техничко-эксплуатационные характеристики судов

К технико-эксплуатационным характеристикам судов относятся: главные размерения судна – характерные размеры судна: длина  $L$ , ширина  $B$ , осадка  $T$ , высота борта  $H$ . Различают главные размерения – расчетные, наибольшие, габаритные;

водоизмещение судна – количество воды, вытесняемое судном, измеряемое 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;

грузоподъемность судна  $m_{гр}$  – масса перевозимых грузов. Грузоподъемность подразделяется на полную (дедвейт  $D_w$ ) и полезную – массу полезного груза, который может принять судно при осадке по грузовую ватерлинию;

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:

$$D_w = D - D_{пор};$$

грузовместимость судна  $W$  – суммарный объем помещений судна, предназначенных для перевозки грузов,  $м^3$ .

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

Чтобы оценить возможности полного применения грузоподъемности, используют понятия удельной грузовместимости и удельного погрузочного объема.

**Удельной грузовместимостью**  $\mu$  называется отношение грузовой вместимости судна  $W$  к массе груза, для которого оно спроектировано:

$$\mu = \frac{W}{m_{\text{гр}}}, \text{ м}^3/\text{т}.$$

**Удельным погрузочным объемом**  $\mu_{\text{гр}}$  называется отношение объема, занимаемого определенным грузом в трюме, к массе этого груза:

$$\mu_{\text{гр}} = \frac{W_{\text{гр}}}{m_{\text{гр}}}, \text{ м}^3/\text{т}.$$

**Скорость судна** – характеристика судна, определяющая быстроту его передвижения. Для речных судов скорость измеряют в километрах в час, а для морских – в узлах (1 узел = 1 морская миля в час = 1,852 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  $v_{\text{эк}}$ , достигаемую при работе СЭУ в эксплуатационном решении при средних квадратурных условиях;
- техническую скорость, определяемую делением пройденного расстояния на время движения.

Автономность судна (АС) (А) – длительность его пребывания в море без пополнения запасов топлива, пресной воды, провизии, измеряют в сутках.

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

## 2. АНАЛИЗ ДАННЫХ ДЛЯ РАСЧЕТА ВОДОИЗМЕЩЕНИЯ СУДНА

### 2.1. Общие сведения. Анализ проектных величин

В 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  $\alpha, \beta, \delta$ ;
- 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, решение которой приводит к определению неизвестных. При этом определение 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 четыре группы:

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

- грузоподъемность  $m_{гр}$  (масса перевозимого груза);
- грузоместимость  $W_{гр}$  (объем грузовых помещений);
- скорость хода  $v$  (узлы, км/ч);
- дальность плавания  $R, r$  (мили, км);
- мощность энергоустановки  $N$  (кВт);
- автономность плавания  $A$  (сутки);
- пассажироместимость  $\Pi$  и т. д.

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

**2. Нормативы.** К группе нормативов относятся величины, регламентированные нормами и правилами классификационных обществ и международных организаций: 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, отношения  $\frac{L}{B}$ ,  $\frac{B}{T}$ ,  $\frac{L}{H}$ ,  $B_{\max}$ , предельная ширина судна (из условия прохода шлюзов или докования), предельная осадка  $T$  и т. д. При выборе параметров необходимо приводить обоснования их величин.

**4. Незвестные 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: запасы топлива, воды, смазочных материалов и т. д.

## 2.2. Выбор судна-прототипа

Проектирование судна носит характер эволюционного творческого процесса. При этом внешним опорным элементом является учет опыта судостроения при новом проектировании. Одной из форм этого опыта является 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 судна-прототипа 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  $\left(\frac{L}{B}\right)_0, \left(\frac{B}{T}\right)_0, \left(\frac{H}{T}\right)_0$ , коэффи-

циенты формы  $\alpha_0, \beta_0, \delta_0, \varphi_0, \psi_0$  и т. д.). Это обеспечивает их реальность и гарантирует от появления 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 разнообразные требования, на практике при проектировании используют несколько прототипов (по водоизмещению и размерениям прототипом 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 определить 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  $\alpha, \beta, \delta$ ;
- 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  $W$  ( $\text{м}^3$ ).

## 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 зависит 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, так как 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 – навигационное оборудование (запасные части);
- 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 определенных последовательности и порядке в специальные ведомости, называемые таблицами нагрузки, табл. 2.1.

Таблица 2.1

### Нагрузка масс судна

| Код раздела по ОСТ | Наименование разделов нагрузки | Масса $m_0$ , т | Плечи, м |       |       | Моменты, 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           | 750             |          |       |       | $M_x = \sum m_i$ |          | $M_z = \sum m_i$ |



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

### 2.3.2. Виды водоизмещения

Для транспортного судна прежде всего различают водоизмещения порожнем и полное, являющиеся крайними случаями состояния нагрузки (минимальное и максимальное).

**Водоизмещением порожнем**  $D_{\text{пор}}$  называется масса полностью отстроенного судна, оснащенного механизмами, системами, устройствами и другими электроэнергетическими системами, средствами связи и управления согласно утвержденной спецификации, но без экипажа, перевозимых грузов и пассажиров, запасов топлива, смазки, воды, продовольствия, фекально-сточных вод. В водоизмещение порожнем 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, введения либо выведения в процессе проектирования и постройки судна по тем или иным причинам незначительных дополнительных масс.

Под **водоизмещением в грузу** подразумевают полную массу судна  $D$ , имея в виду сумму масс всех разделов нагрузки. Эта сумма равна сумме водоизмещения порожнем  $D_{\text{пор}}$  и масс экипажа, масла, воды и продовольствия.

При проведении ряда проверочных расчетов для транспортных судов интерес представляют 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 и такие виды водоизмещения, как:

- судно без груза с 10 % запасов;
- судно без груза со 100 % запасов;
- судно без груза с балластом и 10 % (100 %) запасов;
- 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;

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

С учетом данных табл. 2.1 водоизмещение порожнем, дедвейт и полное водоизмещение определяются так:

$$D_{\text{пор}} = \sum_{i=1}^{13} m_i;$$

$$D_w = \sum_{i=14}^{18} m_i;$$

$$D = D_{\text{пор}} + D_w = \sum_{i=1}^{18} m_i.$$

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 постоянных и переменных масс, то и само оно – величина переменная. Поэтому, говоря о водоизмещении судна, всегда следует оговаривать, к какому состоянию нагрузки (см. п. 2.3.2) оно относится.

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

$$D = m_{\text{ко}} + m_{\text{м}} + m_{11} + m_{14} + m_{15} + m_{16} + m_{17}, \quad (3.2)$$

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

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

а масса механизмов

$$m_{\text{м}} = m_{04} + m''_{09} + m''_{12} + m''_{13}. \quad (3.3)$$

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

На основании опыта, накопленного в теории проектирования, масса корпуса  $m_{\text{ко}}$  в уравнении (3.2) 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  $LBH$  в расчетной практике называется *кубическим модулем*.

Масса механизмов  $m_{\text{м}}$  в (3.3) принимается пропорциональной мощности главных двигателей  $N$ :

$$m_{\text{м}} = f(N^k). \quad (3.4)$$

Показатель  $k$  в (3.4) в большинстве случаев принимается равным 1, 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 дефайте либо грузоподъемности

Решение уравнения (3.2) производят путем выражения определяемых масс через измерители масс.

**Измерителем массы** называется коэффициент пропорциональности между нагрузками массы и элементами (характеристикам) судна.

С учетом сказанного

$$m_{\text{ко}} = p_{\text{ко}} D \text{ или } m_{\text{ко}} = q_{\text{ко}} LDH, \quad (3.5)$$

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

Поскольку массу  $m_{\text{ко}}$  в (3.5) необходимо выразить через водоизмещение, то для этого измеритель следует рассчитать 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  $q_{\text{ко}}$  иногда определяют по прототипу, а в уравнение (3.5) 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, учитывая (3.4), выражают уравнением вида

$$m_{\text{м}} = p_{\text{м}} N = p_{\text{м}} \frac{D^{2/3} \nu^3}{C_{\text{а}}},$$

где  $p_m$  – измеритель массы механизмов, зависящий от типа СЭУ, вспомогательных механизмов и оборудования. Величина  $p_m$  определяется по судну-прототипу:

$$p_m = \left( \frac{m_m}{N} \right)_0.$$

Адмиралтейский коэффициент  $C_a$  также определяется по прототипу:

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

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

$$m_{3в} = p_{3в} D,$$

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

Учитывая изложенное, уравнение (3.2) можно представить в виде

$$D = p_{ко} D + p_m \frac{D^{2/3} v^3}{C_a} + p_{3в} D + D_w, \quad (3.6)$$

если в исходных данных задается дедвейт судна  $D_w$ .

Если задается грузоподъемность, то уравнение (3.6) видоизменяется:

$$D = p_{ко} D + p_m \frac{D^{2/3} v^3}{C_a} + p_{3в} D + D_w + m_{14} + m_{15} + m_{16} + m_{17}.$$

При заданном дедвейте уравнение (3.6) решается сразу после приведения его к виду

$$aD - bD^{2/3} - c = 0, \quad (3.7)$$

где

$$a = (1 - p_{\text{ко}} - p_{\text{зв}}),$$

$$b = p_{\text{м}} \frac{v^2}{C_{\text{а}}},$$

$$c = D_{\text{w}}.$$

При заданной грузоподъемности судна  $m_{\text{гр}} = m_{15}$  прежде чем приступить к решению уравнения (3.7), необходимо определить составляющие дедвейта  $D_{\text{w}}$ . Делается это следующим образом.

Масса  $m_{16}$  запасов топлива, масла и питательной воды для котлов будет

$$m_{16} = q_{\text{т}} K_1 K_2 N A = q_{\text{т}} K_1 K_2 \frac{D^{2/3} v^3}{C_{\text{а}}} A,$$

где  $q_{\text{т}}$  – удельный расход топлива главных двигателей; для дизельных двигателей  $q_{\text{т}} = 0,17 - 0,20$  кг/кВт·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, на стояночные режимы:  $K_1 = 1,1 - 1,2$ ;

$A$  – автономность судна по запасам топлива, ч.

Масса  $m_{14}$  из раздела нагрузки складывается из составляющих:

$$m_{14} = m_{\text{э}} + m_{\text{пр}} + m_{\text{в}} + m_0,$$

где  $m_{\text{э}}$  – масса экипажа:

$$m_{\text{э}} = 0,12 n_{\text{эк}};$$

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

0,12 – средний норматив массы одного члена экипажа;

$m_{\text{пр}}$  – масса запасов провизии:

$$m_{\text{пр}} = 0,004 n_{\text{эк}} A;$$

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

A – автономность плавания, сут;

$m_B$  – масса пресной питьевой и мытьевой воды:

$$m_B = 0,15n_{\text{ЭК}}A;$$

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

$m_0$  – 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  $m_B$  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 (3.7) можно привести к виду

$$aD - b'D^{2/3} - c' = 0, \quad (3.8)$$

где

$$a = (1 - p_{\text{КО}} - p_{3В}),$$

$$b' = (p_{\text{М}} + q_{\text{Т}}K_1K_2A)\frac{v^3}{C_{\text{а}}},$$

$$c' = m_{14} + m_{15} + m_{17}.$$

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

Уравнение (3.8) является алгебраическим уравнением третьего порядка с постоянными коэффициентами. Подстановкой  $D = Z^3$  оно приводится к виду

$$aZ^3 - b'Z^2 - c' = 0 \quad (3.9)$$

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

В результате решения уравнения (3.9) определяется искомое водоизмещение судна  $D_1$ , которому присваивается индекс «1», означающий первое приближение.

### 3.3. Определение в первом приближении главных размеров и коэффициента общей полноты

После нахождения водоизмещения судна  $D_1$  в первом приближении можно найти главные размеры  $L, B, H$ .

Определение ГР можно осуществить двумя способами:

1. Путем совместного решения системы уравнений

$$D = \rho \delta L B T \text{ (уравнение плавучести);}$$

$$h = \varphi_1 \frac{B^2}{T} + \varphi_2 T - \zeta H \text{ (уравнение остойчивости).} \quad (3.10)$$

Если в (3.10) использовать относительную метацентрическую высоту  $\bar{h} = \frac{h}{B}$ , то получим выражение

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

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:

- 0,04–0,05 (сухогрузы);
- 0,015–0,02 (лесовозы);
- 0,07–0,12 (танкеры).



## Уравнение грузовместимости

$$LBH = \frac{m_{\text{гр}} \mu_{\text{гр}}}{\delta_{\text{тр}} (1 - \zeta) \lambda (1 - \chi)}. \quad (3.11)$$

Уравнение (3.11) выражает кубатуру трюмов через  $L, B, H$ .

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

$\mu_{\text{гр}}$  – удельный погрузочный объем (объем, занимаемый единицей груза), м<sup>3</sup>/т;

$\delta_{\text{тр}} = 0,93\text{--}0,96$  – коэффициент полноты трюма;

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

$\lambda = 0,7\text{--}0,76$  отношение длины трюмов к длине судна;

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

## 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

$$D_1 = \rho_1 \delta_1 L_1 B_1 T_1,$$

учитывая, что

$$\frac{L_1}{B_1} = \frac{L_0}{B_0} = \alpha;$$

$$\frac{B_1}{T_1} = \frac{B_0}{T_0} = b';$$

$$\frac{H_1}{T_1} = \frac{H_0}{T_0} = h;$$

$$T_1 = B_1 = \frac{1}{b'},$$

получим, что

$$D_1 = \rho \delta_1 L_1 B_1 a B_1 \frac{1}{b'},$$

откуда

$$\begin{aligned} D_1 &= \rho \delta_1 a B_1^3; \\ B_1 &= \left( \frac{D_1 b'}{\rho \delta_1 a} \right)^{\frac{1}{3}}, \end{aligned} \quad (3.12)$$

или с учетом (3.12) ширина судна в первом приближении

$$B_1 = \left( \frac{D_1 \left( \frac{B_0}{T_0} \right)}{\rho \delta_1 \left( \frac{L_0}{B_0} \right)} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (3.13)$$

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

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

$\delta_1$  – коэффициент общей полноты, принимаемый по данным судна-прототипа:  $\delta_1 = \delta_0$ .

Подставляя полученное значение  $B_1$  в выражение (3.12), получим

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

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

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL_1}}.$$

Можно определить  $\delta$  по таким зависимостям:

- для сухогрузов при  $Fr = 0,14-0,26$

$$\delta = 1,09 - 1,68Fr \pm 0,12; \quad (3.14)$$

- для танкеров и судов, перевозящих массовые грузы:

$$\delta = 1,05 - 1,4Fr \pm 0,06. \quad (3.15)$$

Таким образом, для определения коэффициента  $\delta$  необходимо по заданной скорости и рассчитанной длине подсчитать число Фруда и затем по (3.14) либо (3.15) вычислить диапазон изменения  $\delta$ . Если принятое ранее по прототипу  $\delta$  попадает в этот диапазон, то для дальнейших расчетов следует принять это значение  $\delta_1$ .

Если  $\delta$  не попадает в диапазон значений по (3.14) или (3.15), то следует остановиться на значении  $\delta$ , которое получается по результатам расчета по (3.14) или (3.15), 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

| Соотношение<br>размерений | Район плавания |     |    |       |        |     |
|---------------------------|----------------|-----|----|-------|--------|-----|
|                           | Неограниченный | I   | II | II СП | III СП | III |
| $\frac{L}{H}$             | 18             | 19  | 20 | 21    | 22     | 23  |
| $\frac{B}{H}$             | 2,5            | 2,5 | 3  | 3     | 3      | 4   |

После корректирования основных элементов переходят к расчету нагрузки проектируемого судна, который сводят в таблицу (табл. 3.2).

Таблица 3.2

## Нагрузка масс проектируемого судна в первом приближении

| Наименование разделов             | Формула                             | Масса, т |
|-----------------------------------|-------------------------------------|----------|
| Корпус оборудованный              | $m_o = q_{\text{ко}} LBH$           |          |
| Механизмы                         | $m_m = p_m N_1$                     |          |
| Запас водоизмещения               | $m_{3в} = p_{3в} D$                 |          |
| Водоизмещение порожнем            | $D_{\text{пор}} = \sum_{i=1}^3 m_i$ |          |
| Экипаж, провизия,<br>вода, отходы | $m_{14}$                            |          |
| Груз перевозимый                  | $m_{15}$                            |          |
| Топливо, масло,<br>питьевая вода  | $m_{16} = q_t K_1 K_2 N_1 A$        |          |
| Переменные жидкие грузы           | $m_{17}$                            |          |
| Дедвейт                           | $D_w = \sum_4^7 m$                  |          |
| Водоизмещение в грузу             | $\sum_1 = D_{\text{пор}} + D_w$     |          |

В расчетах на стадии первого приближения мощность СЭУ  $N_1$  рассчитывается по адмиралтейской формуле:

$$N_1 = \frac{D^{2/3} U^3}{C_a},$$

где адмиралтейский коэффициент  $C_a$  берется по данным судна-прототипа.

Стабильность коэффициента Нормана позволяет использовать его для ориентировочных расчетов водоизмещения. В данном случае численные значения этого коэффициента выбираются на основании состава нагрузки масс на однотипных судах.

Таким образом, для выполнения второго приближения необходимо рассчитать коэффициент Нормана и далее по уравнению установить водоизмещение судна  $D_2$ :

$$dm_{\text{тр}} = D_2 - \Sigma_2. \quad (3.16)$$

После определения  $D_2$  основные элементы судна во втором приближении можно найти простым расчетом. При этом если нет ограничений по главным размерениям, то, определив коэффициент пе-

ресчета  $\lambda_2 = \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^{\frac{1}{3}}$ , далее получают значения основных элементов во втором приближении:

$$L_2 = \lambda_2 L_1; \quad B_2 = \lambda_2 B_1; \quad T_2 = \lambda_2 T_1; \quad H_2 = \lambda_2 H_1; \quad N_2 = \lambda_2 N_1.$$

По вычисленным во втором приближении основным элементам судна вновь вычисляется суммарная нагрузка  $\Sigma_2$  и сопоставляется с водоизмещением судна  $D_2$ . Вновь считается разница  $dm_{\text{тр}}$  между  $D_2$  и  $\Sigma_2$ , уравнение (3.16).

Обычно величина  $dm_{\text{тр}} < 0,5 \%$ , что позволяет устранить выявленное расхождение между  $D_2$  и  $\Sigma_2$  за счет изменения запаса водоизмещения либо коэффициента общей полноты.

При расхождении между  $D_2$  и  $\Sigma_2$  более  $0,5 \%$  необходимо выполнить третье приближение, аналогичное второму.

### 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, т. е.

$$m_{\text{ко}} = m_{\text{ст}} + m_{\text{об}}. \quad (3.17)$$

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

$$m_{\text{ст}} = q_{\text{ст}} LBH, \text{ кг/м}^3;$$

$$m_{\text{ст}} = q'_{\text{ст}} LBH', \text{ кг/м}^3;$$

$$m_{\text{ст}} = q''_{\text{ст}} A_1 A_2 A_3 \delta^{\frac{1}{3}} \left( \frac{L}{H} \right)^{\frac{1}{2}} LBH', \text{ кг/м}^3, \quad (3.18)$$

где  $L, B, H$  – главные размерения судна;

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

$\delta$  – коэффициент общей полноты.

Приведенная высота борта  $H'$  определяется по уравнению

$$H' = H + \frac{\sum l_{\text{н}}}{L} h_{\text{н}}, \quad (3.19)$$

где  $\sum l_{\text{н}}$  – суммарная длина надстроек и рубок первого яруса;

$h_{\text{н}}$  – средняя высота надстроек.

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

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

$A_2 = 1,0$  (однопалубное судно);

$A_1 = 1,06$  (двухпалубное судно);

$A_1 = 1,112$  (трехпалубное судно).

$$A_3 = 1,0, \quad L = 70/150 \text{ м};$$

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

Массу оборудования в (3.17) рассчитывают по формуле

$$m_{об} = q_{об} (LBH)^{\frac{2}{3}}, \quad (3.20)$$

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 судов ВВТ равняется 1,3–1,8 т/м<sup>3</sup>.

Масса механизмов  $m_m$  и топлива  $m_t$  выражается через мощность, необходимую для движения судна с заданной скоростью, и соответствующие измерителям массы  $p_m$  и  $q_t$ . При этом

$$m_m + m_t = \left( p_t + K_1 K_2 q \frac{r}{v} \right) N, \quad (3.21)$$

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 (3.2), (3.18)–(3.21), получим

$$\begin{aligned} \rho \delta LBT = & q_{ст}'' A_1 A_2 A_3 \delta^{\frac{1}{3}} \left( \frac{L}{H} \right)^{0,5} LBH' + q_{об} (LBH)^{\frac{2}{3}} + \\ & + p_{зв} (\rho \delta LBT) + \left( p_m + K q_t \frac{r}{v} \right) \frac{(\rho \delta LBT)^{\frac{2}{3}} v^3}{c} + m_{тр} + m_{сн}. \end{aligned} \quad (3.22)$$

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

$$h = r + z_c - z_y = \varphi_1 \frac{B^2}{T} + \varphi_2 T - \zeta H. \quad (3.23)$$

В качестве добавочных могут быть также использованы следующие соотношения:

$$\frac{L}{B} = a; \quad \frac{B}{T} = b'; \quad \frac{H}{T} = h; \quad \delta_1 = \delta_0. \quad (3.24)$$

Совместным решением уравнений (2.22)–(2.24) определяются элементы  $L$ ;  $B$ ;  $T$ ;  $H$ ;  $\delta$  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

$$D = \rho \delta LBT \quad (3.25)$$

в процессе проектирования используют некоторые модификации (3.25).

Так, например, из (3.13) после преобразований можно записать

$$\frac{B_1}{D_1^{\frac{1}{3}}} = b_0 = \left( \frac{b'}{\rho \delta} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (3.26)$$

где  $b_0$  – относительная ширина (размерная величина).

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



$$b_0 = \frac{B}{D^{\frac{1}{3}}} = \left( \frac{1}{\rho\delta} \left( \frac{L}{B} \right)^{-1} \frac{B}{T} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (3.27)$$

Проведя преобразования (3.27) относительно длины  $L$ , получим

$$\begin{cases} \frac{L}{B} = a; \quad \frac{B}{T} = b'. \\ T = \frac{B}{b'} = \frac{L}{ab'}; \quad B = \frac{L}{a}. \end{cases} \quad (3.28)$$

Тогда  $L = aB$ ;  $B = Tb'$ .

Учитывая (3.28), уравнение (3.25) примет вид

$$D = \rho\delta L \frac{L}{a} \frac{L}{ab'} = \rho\delta \frac{L^3}{a^2 b'} \Rightarrow L^3 = \frac{Da^2 b'}{\rho\delta}$$

или

$$\frac{L}{D^{\frac{1}{3}}} = \left( \frac{a^2 b'}{\rho\delta} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

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

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

Проведя преобразования (3.28) 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

$$D = \rho \delta T b' a T b' T = \rho \delta T^3 (b')^2 a \Rightarrow \frac{T}{D^{1/3}} = \left( \frac{1}{\rho \delta (b')^2 a} \right)^{1/3}. \quad (3.29)$$

Обозначим отношение  $\frac{T}{D^{1/3}}$  через  $t_o$  (относительная осадка), тогда выражение (3.29) примет вид

$$t_o = \frac{T}{D^{1/3}} = \left( \frac{1}{\rho \delta} \left( \frac{B}{T} \right)^{-2} \left( \frac{L}{B} \right)^{-1} \right)^{1/3}.$$

Принимая во внимание соотношение между массовыми и объемными водоизмещениями в виде

$$D^{1/3} = \rho^{1/3} V^{1/3},$$

откуда

$$V^{1/3} = \frac{D^{1/3}}{\rho^{1/3}},$$

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

$$l = \frac{L}{v^{1/3}} = \left( \frac{1}{\delta} \left( \frac{L}{B} \right)^2 \left( \frac{B}{T} \right) \right)^{1/3} = \rho^{1/3} l_o;$$

$$b = \frac{B}{v^{1/3}} = \left( \frac{1}{\delta} \left( \frac{L}{B} \right)^{-1} \left( \frac{B}{T} \right) \right)^{1/3} = \rho^{1/3} b_o;$$

$$l = \frac{T}{v^{1/3}} = \left( \frac{1}{\delta} \left( \frac{L}{B} \right)^{-1} \left( \frac{B}{T} \right)^{-2} \right)^{1/3} = \rho^{1/3} t_0.$$

В полученных уравнениях параметры  $l$ ,  $b$ ,  $t$  и  $l_0$ ,  $b_0$ ,  $t_0$  – 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 её модификации, практический интерес представляет уравнение плавучести в дифференциальной форме. Оно получается путем дифференцирования уравнения плавучести в алгебраической форме (3.25) в предположении, что величины  $\delta$ ,  $L$ ,  $B$ ,  $T$  являются независимыми переменными. Тогда при

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

получим, что полный дифференциал функции  $D$  представляется в виде

$$dD = \frac{\partial D}{\partial \delta} d\delta + \frac{\partial D}{\partial L} dL + \frac{\partial D}{\partial B} dB + \frac{\partial D}{\partial T} dT. \quad (3.30)$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial D}{\partial \delta} = \rho L B T = \frac{D}{\delta}; \\ \frac{\partial D}{\partial L} = \rho L B T = \frac{D}{L}; \\ \frac{\partial D}{\partial B} = \rho L B T = \frac{D}{B}; \\ \frac{\partial D}{\partial T} = \rho L B T = \frac{D}{T}, \end{array} \right. \quad (3.31)$$

уравнение (3.30) можно представить в виде

$$\frac{dD}{D} = \frac{d\delta}{\delta} + \frac{dL}{L} + \frac{dB}{B} + \frac{dT}{T}. \quad (3.32)$$

Уравнение (3.32) в дисциплине «Проектирование судов» называется *уравнением плавучести в дифференциальной форме*. В задачах, которые решаются с помощью уравнения (3.32), малые конечные приращения элементов  $\Delta\delta, \Delta L, \Delta B, \Delta T$  рассматриваются приближенно, как дифференциалы этих величин  $d\delta, dL, dB, dT$ . Указанная особенность уравнения (3.32) позволяет прогнозировать изменения, например, водоизмещения  $D$ , если известны изменения размеров.

Так, например, если

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

то в соответствии с (3.32)

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

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 (уравнение (3.32)). Можно решить и обратную задачу, т. е. установить, как будут изменяться размерения, если изначально будет известно изменение водоизмещения  $D$ . Проиллюстрируем сказанное решением следующего примера.

### П р и м е р

Определить изменение размерений  $dL$ ,  $dB$ ,  $dT$ , если известно изменение грузоподъемности  $dm_{\text{гр}}$ .

### Р е ш е н и е

Изменение водоизмещения

$$dD = \eta_{\text{н}} dm_{\text{гр}}. \quad (3.33)$$

С другой стороны, на основании (3.32) можно записать

$$dD = \frac{D}{\delta} d\delta + \frac{D}{L} dL + \frac{D}{B} dB + \frac{D}{T} dT. \quad (3.34)$$

При  $\delta = \text{const}$   $d\delta = 0$ .

При постоянных значениях отношений  $\frac{L}{B}$ ,  $\frac{B}{T}$  отношения дифференциалов также будут постоянными, т. е. при

$$\frac{L}{B} = \text{const} \quad \text{и} \quad \frac{B}{T} = \text{const}$$

$$\frac{dL}{dB} = \frac{L}{B};$$

$$\frac{dB}{dT} = \frac{B}{T}.$$

Из сказанного следует

$$dL = L \frac{dB}{B};$$

$$dB = L \frac{dT}{T};$$

$$dT = dB \frac{T}{B};$$

$$B = dB \frac{L}{dL};$$

$$dB = B \frac{dL}{L};$$

$$dT = B \frac{dL}{L} \frac{T}{B} = T \frac{dL}{L}.$$

Из (3.34)

$$\frac{dD}{D} = \frac{dD}{L} + \frac{dB}{B} + \frac{dT}{T}.$$

#### 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  $\delta$ . 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

$$dm_{\text{гр}} = D_1 - \sum_1.$$

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

$$D_2 = D_1 + \eta_{\text{Н}} dm_{\text{гр}}, \quad (4.1)$$

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

$$\eta_{\text{Н}} = \frac{1}{a - \frac{2}{3} b' D_1^{-1/3}}. \quad (4.2)$$

Таким образом, для выполнения второго приближения необходимо по (4.2) рассчитать коэффициент Нормана и по (4.1) – водоизмещение судна  $D_2$ .

После определения водоизмещения во втором приближении основные элементы можно найти простым пересчетом. Если нет

ограничений по главным размерениям, то определив коэффициент пересчета

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

получим

$$L_2 = \lambda_2 L_1; B_2 = \lambda_2 B_1; T_2 = \lambda_2 T_1; H_2 = \lambda_2 H_1; N_2 = \lambda_2^2 N_1; \delta = \text{idem}.$$

По вычисленным во втором приближении основным элементам судна следует снова составить нагрузку, записав ее в таблице, 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.

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

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

Можно несколько по-другому подойти к определению главных размерений судна, если известно изменение грузоподъемности  $dm_{\text{гр}}$ , а следовательно, и водоизмещения

$$\Delta D = \eta_n dm_{\text{гр}}.$$

Для этого необходимо использовать уравнение плавучести в дифференциальной форме, которое при малых, но конечных приращениях  $\Delta L$ ,  $\Delta B$ ,  $\Delta T$  примет вид

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



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

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

Очередным этапом в определении основных элементов судна является выбор коэффициентов полноты площади конструктивной ватерлинии  $\alpha$  и мидель-шпангоута  $\beta$ , а также рекомендуемого значения абсциссы центра величины  $x_c$  и площади конструктивной ватерлинии (КВЛ) –  $x_f$ .

При их выборе необходимо иметь в виду, что  $\alpha$  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

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

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

Для определения  $\beta$  можно использовать также эмпирическую формулу

$$\beta = 1,014\delta^{1/12} \pm 0,004.$$

Для менее полных и относительно быстроходных судов коэффициент  $\beta$  должен принимать меньшие значения.

Положение центра величины (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 нос приводит к уменьшению волнового сопротивления и увеличению сопротивления формы. Поэтому при больших числах Фруда, когда основную роль в полном сопротивлении играет волновая составляющая, ЦВ целесообразно смещать в корму, и наоборот.

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

$$x_c / L = f(\delta).$$

Рекомендуемая зависимость

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

Кривые сопротивления

$$R = f(x_c / L)$$

положи в области 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

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

## 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, грузовместимость 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 машинного отделения 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 по найденным главным размерениям на миллиметровой бумаге формата А4 или А3 изображают боковой вид (или разрез по диаметральной плоскости) судна и план главной палубы, составляют теоретические и практические шпангоуты.

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

$$a = 0,002L + 0,48.$$

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 | Машинное отделение<br>в средней части | Машинное<br>отделение 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 машинного отделения целесообразно выбрать по прототипу.

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

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

Вместимость отсеков двойного дна и двойных бортов должна быть достаточной для 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 определяется по укрупненным разделам нагрузки с использованием разработанной схемы общего расположения.

Схема расчета дана в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Расчет нагрузки и положения ЦТ судна

| Наименование разделов            | Масса<br>$m_i, \text{т}$ | Плечи, м  |           | Моменты, т. м          |                        |
|----------------------------------|--------------------------|-----------|-----------|------------------------|------------------------|
|                                  |                          | $x_i$     | $z_i$     | $m_i x_i$              | $m_i z_i$              |
| Корпус оборудованный             | $m_{\text{КО}}$          | $x_1$     | $z_1$     | $m_{\text{КО}} x_1$    | $m_{\text{КО}} z_1$    |
| Механизмы                        | $m_{\text{М}}$           | $x_2$     | $z_2$     | $m_{\text{М}} x_2$     | $m_{\text{М}} z_2$     |
| Запас водоизмещения              | $m_{3\text{В}}$          | $x_3 = U$ | $z_3 = H$ | $m_{3\text{В}} x_3$    | $m_{3\text{В}} z_3$    |
| <b>ВОДОИЗМЕЩЕНИЕ ПОРОЖНЕМ</b>    | $\sum_{i=1}^3 m_i$       | -         | -         | Более<br>$m_i x_i$     | Более<br>$m_i z_i$     |
| Экипаж с багажом                 | $m_{\text{Э}}$           | $x_4$     | $z_4$     | $m_{\text{Э}} x_4$     | $m_{\text{Э}} z_4$     |
| «провизия»                       | $m_{\text{МО}}$          | $x_5$     | $z_5$     | $m_{\text{МО}} x_5$    | $m_{\text{МО}} z_5$    |
| «пресная вода»                   | $m_{\text{В}}$           | $x_6$     | $z_6$     | $m_{\text{В}} x_6$     | $m_{\text{В}} z_6$     |
| Груз перевозимый                 | $m_{\text{ГР}}$          | $x_7$     | $z_7$     | $m_{\text{ГР}} x_7$    | $m_{\text{ГР}} z_7$    |
| Топливо, масло, питательная вода | $m_{\text{Т}}$           | $x_8$     | $z_8$     | $m_{\text{Т}} x_8$     | $m_{\text{Т}} z_8$     |
| Сточные воды                     | $m_{\text{СТ}}$          | $x_9$     | $z_9$     | $m_{\text{СТ}} x_9$    | $m_{\text{СТ}} z_9$    |
| <b>ДЕДВЕЙТ</b>                   | $\sum_{i=4}^9 m_i$       | -         | -         | $\sum_{i=4}^9 m_i x_i$ | $\sum_{i=4}^9 m_i z_i$ |
| <b>ВОДОИЗМЕЩЕНИЕ В ГРУЗУ</b>     | $\sum_{i=1}^9 m_i$       | -         | -         | $\sum_{i=1}^9 m_i x_i$ | $\sum_{i=1}^9 m_i z_i$ |

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

$$x_g^{\text{пор}} = \frac{\sum_{i=1}^3 m_i x_i}{\sum_{i=1}^3 m_i};$$

$$z_g^{\text{пор}} = \frac{\sum_{i=1}^3 m_i z_i}{\sum_{i=1}^3 m_i}.$$

Координаты ЦТ судна в грузу

$$x_g = \frac{\sum_{i=1}^9 m_i x_i}{\sum_{i=1}^9 m_i};$$

$$z_g = \frac{\sum_{i=1}^9 m_i z_i}{\sum_{i=1}^9 m_i}.$$

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 диаметральной плоскости;
- 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) определяются 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» относится к прототипу, а  $L$  и  $H$  – длина и высота проектируемого судна;

- остальные координаты составляющих дедвейта (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 приближенным формулам, 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 собой 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 льдами (рис. 6.1).

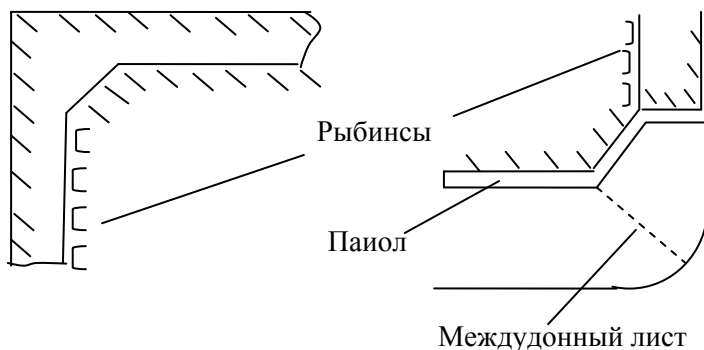


Рис. 6.1



Под *объемом льяд* 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 кромок бимсов. Как и в предыдущем случае, объем пайола и льяд 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  $W_{\text{пп}}$  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 грузовых люков. Также в подпалубную вместимость не входит объем грузовых помещений в надстройках, если на судне имеются такие помещения.

Отношение вместимости трюмов к чистой грузоподъемности судна называется удельной вместимостью

$$\mu = \frac{W}{m_{\text{гр}}}.$$

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 м<sup>3</sup>/т – для свинца в чушках, 15–20 м<sup>3</sup>/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 м<sup>3</sup>/т, а шельтердечных судов 1,8–2,2 м<sup>3</sup>/т. Эти величины имеют тенденции к росту.

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

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

где  $l_n$  – длина машинного отделения.

По Бастарду:

$$W = (\delta + (0,08...0,10)) l BH_{\text{тр}},$$

где  $l$  – суммарная длина трюмов;

$H_{\text{тр}} = H - h_d$  – 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   |
| диптаник (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 необходимо найти объем форпика, ахтерпика и коридора гребного вала;  $\omega_n$  – объем пиков и коридора гребного вала;  $l_n$  – суммарную длину форпика и ахтерпика;  $c$  – численный коэффициент.

В соответствии с этим подпалубную вместимость за вычетом объема  $\omega_n$  можно подсчитать по формуле

$$W_1 = K_{\text{п}} W_{\text{пп}},$$

где

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

Коэффициент  $\frac{C}{100}$  зависит от коэффициента общей полноты и принимает следующие значения:

|                 |      |      |      |      |
|-----------------|------|------|------|------|
| $\delta$        | 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  $K_{\pi} = 0,95$ .

Для морских грузовых судов вместимость двойного дна в качестве средней величины можно принять

$$\omega_{\pi} = 0,1V,$$

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

$$W_{\pi\pi} = K_0 LBH_{\text{тр}},$$

где  $K_0$  – численный коэффициент полноты подпалубного объема.

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

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

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

$$W_M = K_M l_M B H_{\text{тр}}, \quad (6.3)$$

где  $K_M$  – коэффициент пропорциональности – полноты объема машинного отделения;

$l_M$  – 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:

$$W = (K_0 K_{\Pi} L - K_M l_M) B H_{\text{тр}}. \quad (6.4)$$

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

$$\frac{W}{D} = \frac{1}{\gamma^{\delta}} \left( K_0 K_{\Pi} - K_M \frac{l_M}{L} \right) \left( \frac{H}{T} - \frac{h_d}{T} \right). \quad (6.5)$$

Но так как коэффициент утилизации водоизмещения по чистой грузоподъемности  $\eta_D = \frac{P_{\text{гр}}}{D}$  и удельная вместимость  $\mu = \frac{W}{P_{\text{гр}}}$  связаны

с отношением  $\frac{W}{D}$  равенством  $\frac{W}{D} = \mu \eta_D$ , то выражение (6.5) может быть переписано в виде

$$\mu = \frac{1}{\gamma^{\delta} \eta_D} \left( K_0 K_{\Pi} - K_M \frac{l_M}{L} \right) \left( \frac{H - h_d}{T} \right), \quad (6.6)$$

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  $K_0$ ,  $K_{\Pi}$ ,  $K_M$  и  $\eta_D$ . Что касается коэффициента  $K_0$ , то его можно вычислить по формуле Бастарда

$$K_0 = (0,08...0,10) + \delta.$$

О вычислении коэффициента  $K_n$  было сказано выше.

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

$$W = a l B H_{\text{тр}}; \quad (6.7)$$

– для нефтевоза

$$W = a' l B H,$$

где  $a = 0,85-0,90$  и  $a' = 0,95-0,98$  – коэффициенты полноты объема  $W$ , которые несколько меньше единицы ( $0,85-0,98$ ) и вычисляются в зависимости от коэффициентов формы корпуса ( $\delta, \alpha, \beta$ ), соотношений главных размерений  $\left( \frac{T}{H_{\text{тр}}}, \frac{H}{T} \right)$ , седловатости, погиби, бим-

сов, развала бортов, телесности набора, а для сухогрузных судов – с учетом объема двойного дна и объема льяд;

$l$  – суммарная длина грузовых трюмов.

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

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

$$\mu = \frac{a}{\gamma \delta \eta_D} \frac{l}{L} \frac{H_{\text{тр}}}{T}. \quad (6.8)$$

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 об удельной вместимости, то уравнение вместимости примет вид

$$\mu = \frac{1}{1 + \nu} \frac{a'}{\gamma \delta \eta_D} \frac{l}{L} \frac{H}{T}, \quad (6.9)$$

который отличается от предыдущего уравнения (6.8) присутствием множителя  $\nu$ , учитывающего объем, необходимый на расширение нефтепродуктов. Кроме того, для нефтевозов  $H_{тр} = H$ . Коэффициент  $\nu$  в (6.9) зависит от условий плавания. Обычно принимают  $\nu = 0,025-0,035$ .

На рис. 6.2: 1 – машинное отделение; 2 – коффердам; 3 – топливные цистерны; 4 – грузовые цистерны; 5 – помповое (насосное) отделение; 6 – сухогрузный трюм.

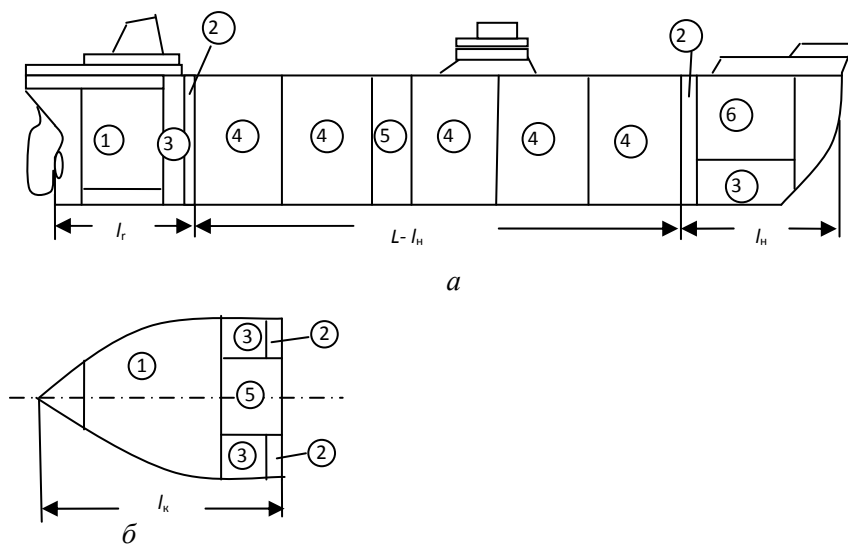


Рис. 6.2

Помповое (насосное) отделение на нефтевозах располагается, как правило, между грузовыми танками (рис. 6.2, а) или в корме, примыкающим к машинному отделению (рис. 6.2, б). Из рис. 6.2 следует, что длина грузовых танков может быть выражена равенством

$$l = L - (1 + \lambda)l_k - l_n,$$

в котором коэффициент  $\lambda = \frac{l_n}{l_k}$  определяет условия удифферентовки.

Для судов с расположением помпового отделения в корме принимаем  $l_n = 0$ , ибо длина  $l_n$  входит в  $l_k$ . Коэффициент  $\lambda$  представляет собой отношение длины форпика, сухогрузного трюма и коффердама к длине ахтерпика, машинного отделения, топливной цистерны и коффердама. При увеличении коэффициента  $\lambda$  грузовые цистерны и машинное отделение смещаются в нос. Численное значение коэффициента  $\lambda$  следует выбирать таким образом, чтобы получить желательное положение ЦТ по длине судна.

Отношение

$$\frac{l}{L} = 1 - \frac{(1 + \lambda)l_k + l_n}{L} \quad (6.10)$$

называется коэффициентом утилизации (использования) длины судна.

Воспользовавшись равенством (6.10), уравнение вместимости нефтевозов (6.9) можно представить в виде

$$\mu = \frac{1}{1 + v} \frac{a'}{\gamma^\delta \eta_D} \frac{H}{T} \left( 1 - \frac{(1 + \lambda)l_k + l_n}{L} \right).$$

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

Рассматривая  $\mu$  как заданную величину, можно решить уравнение вместимости относительно  $\delta$ ,  $\frac{H}{T}$  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  $\lambda$ , то его в первом приближении лучше определить по прототипу, а окончательную длину  $l_n$  установить после проверочного расчета удифферентовки.

Анализируя формулы вместимости, можно отметить, что вместимость судна увеличивается с возрастанием его габаритных размеров. Такое же влияние оказывает и коэффициент  $\delta$ , поскольку с возрастанием полноты судна увеличиваются коэффициенты  $K_0, a, a'$ .

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  $\eta_0 = \text{idem}$ . Поэтому ширина судна не входит в уравнение вместимости, а осадка фигурирует лишь в виде отношения  $\frac{H}{T}$ .

Отношение

$$\frac{H_{\text{тр}}}{T} = \frac{H}{T} - \frac{h_d}{T}$$

непосредственно входит в уравнение 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  $\mu$  достигается за счет частичного уменьшения коэффициента водоизмещения.



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

Увеличение коэффициента  $\delta$ , которое сопровождается возрастанием  $\eta_D$ , приводит к уменьшению удельной вместимости  $\mu$ .

При определении пассажировместимости пользуются данными прототипов в виде таких показателей, как отношение числа перевозимых пассажиров  $n$  к водоизмещению судна  $D$ , т. е.  $\frac{n}{D}$ , или к про-

изведению  $LB$  длины судна на ширину  $\frac{n}{LB}$ , или к длине судна

$$L - \frac{n}{L}.$$

Для судов дальнего плавания (каютное расположение пассажиров) о степени комфортабельности можно судить по коэффициенту

$\frac{n}{L}$ , а для судов с большим числом пассажиров, не имеющих коечных мест (суда местных линий), показательным является коэффициент  $\frac{LB}{n}$ .

Показатели комфортабельности зависят также от района плавания.

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....   | 3  |
| 1. ЗАДАЧА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДОВ И МЕТОДЫ<br>ЕЁ РЕШЕНИЯ.....   | 6  |
| 1.1. Общие сведения о дисциплине .....   | 6  |
| 1.2. Место дисциплины «Проектирование судов» среди<br>судостроительных дисциплин .....             | 7  |
| 1.3. Классификация известных и неизвестных элементов<br>(величин) проектируемого судна .....       | 8  |
| 1.4. Основные взаимосвязи между известными и неизвестными<br>элементами проектируемого судна.....  | 9  |
| 1.5. Техничко-эксплуатационные характеристики судов .....  | 11 |
| 2. АНАЛИЗ ДАННЫХ ДЛЯ РАСЧЕТА ВОДОИЗМЕЩЕНИЯ<br>СУДНА .....  | 13 |
| 2.1. Общие сведения. Анализ проектных величин .....  | 13 |
| 2.2. Выбор судна-прототипа .....   | 14 |
| 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<br>ПРИБЛИЖЕНИИ.....                                    | 19 |
| 3.1. Основные расчетные уравнения .....  | 19 |
| 3.2. Методика расчета водоизмещения судна $D$ при заданных<br>дедвейте либо грузоподъемности ..... | 21 |
| 3.3. Определение в первом приближении главных размерений<br>и коэффициента общей полноты .....     | 25 |
| 3.4. Частные случаи представления массы корпуса .....  | 31 |
| 3.5. Модификации уравнения плавучести в алгебраической<br>форме .....                              | 33 |
| 3.6. Уравнение плавучести в дифференциальной форме.....  | 36 |
| 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СУДНА<br>ВО ВТОРОМ ПРИБЛИЖЕНИИ .....                             | 40 |

|  |    |
|--|----|
| 5. РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ОБЩЕГО РАСПОЛОЖЕНИЯ .....  | 44 |
| 6. РАСЧЕТ ВМЕСТИМОСТИ СУДНА.....   | 49 |
| 6.1. Классификация грузов. Вместимость и грузовместимость судна. Удельная грузовместимость и удельный погрузочный объем перевозимого груза ..... | 49 |
| 6.2. Приближенные способы обеспечения грузовместимости при проектировании судна .....  | 51 |