

Раков А.И. Душко В.Р. Кузьмина А.В. Жибоедов В.В.

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

Часть 1

**Определение основных элементов
и главных размерений
проектируемого судна**

Севастополь 2013

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ,
МОЛОДЕЖИ И СПОРТА УКРАИНЫ
Севастопольский национальный технический университет

**«ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДОВ
И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ»**

**ЧАСТЬ 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
И ГЛАВНЫХ РАЗМЕРЕНИЙ ПРОЕКТИРУЕМОГО СУДНА**

СЕВАСТОПОЛЬ 2013

ББК 39.42-01я73
О 75
УДК 629.5.01(075)

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри «Теорії та проектування суден» Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова В.О. Некрасов;
д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри «Захисту інформації» Академії військово-морських сил ім. П.С. Нахімова В.І. Чумаков;
д-р техн. наук, проф., ст. наук. сп. МГІ НАН України Н.О. Греков.

Научный редактор – д-р техн. наук, проф. кафедри № 12 СВМІ ім. П.С. Нахімова В.П. Комаров.

Раков О.І., Душко В.Р., Кузьміна Г.В., Жибоедов В.В.

О 75 Основи проектування суден і плавучих споруд. Частина 1. Визначення основних елементів і головних розмірів проектного судна: навч. посібник/ О.І. Раков, В.Р. Душко, Г.В. Кузьміна, В.В. Жибоедов. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2013 – 230 с.
ISBN 978-617-612-064-8

Навчальний посібник призначений для вивчення курсу «Основи проектування суден і плавучих споруд» та виконання курсового проекту по названій дисципліні студентами спеціальності 7.05120101 «Кораблі і океанотехніка». У навчальному посібнику викладені загальні завдання і методи визначення основних елементів і головних розмірів в процесі проектування судна.

Раков А.И., Душко В.Р., Кузьмина А.В., Жибоедов В.В.

О 75 Основы проектирования судов и плавучих сооружений. Часть 1. Определение осных элементов и главных размерений проектируемого судна: учеб. пособие / А.И. Раков, В.Р. Душко, А.В. Кузьмина, В.В. Жибоедов – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2013 – 230 с.
ISBN 978-617-612-064-8

Учебное пособие предназначено для изучения курса «Основы проектирования судов и плавучих сооружений» и выполнения курсового проекта по названной дисциплине студентами специальности 7.05120101 «Корабли и океанотехника». В учебном пособии изложены общие задачи и методы определения основных элементов и главных размерений в процессе проектирования судна.

Rakov A.I., Dushko V.R., Kuzmina A.V., Jiboedov V.V.

О 75 Bases of planning of courts and floating buildings. Part 1. Determination of osnykh elements and above all razmerenyy of the designed ship: train aid / A.I. Rakov, V.R. Dushko, A.V. Kuzmina, V.V. Jiboedov. – Sevastopol: SevNTU Publishing., 2013 – 230 p.
ISBN 978-617-612-064-8

A train aid is intended for the study of course of «Basis of planning of courts and floating buildings» and implementation of course project on the adopted discipline by the students of speciality a 7.05120101 «Ships and okeanotekhnika». In a train aid general tasks and methods of determination of basic elements and above all razmerenyy are expounded in the process of planning of ship.

Решение Министерства образования и науки, молодежи и спорта Украины о присвоении грифа «Рекомендовано Министерством образования и науки, молодежи и спорта Украины» в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, которые обучаются по специальности «Корабли и океанотехника» № 1/11-12617 от 06.08.2013.

ISBN 978-617-612-064-8

ББК 39.42-01я73
© Издательство СевНТУ, 2013 г.

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ И УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

АКТ – архитектурно-конструктивный тип;

МКО – машинно-котельное отделение;

СПБУ – самоподъемная буровая установка;

ППБУ – полупогружная буровая установка;

ДГ – дизель-генератор;

СОЛАС – Международная конвенция по охране человеческой жизни на море;

МЭА – Международная эргономическая ассоциация;

СЧМ – система человек-машина;

ISO – Международная организация стандартизации;

СОИ – средства отображения информации;

ЦПУ – центральный пост управления;

Δ – весовое водоизмещение судна, кН;

∇ – объемное водоизмещение судна, м³;

W – кубатура судна, м³;

N_e – мощность главных механизмов, кВт;

L – длина судна, м;

B – ширина судна, м;

d – осадка судна, м;

D – высота борта судна, м;

P_{ep} – грузоподъемность, кН;

n_{nac} – количество пассажиров;

V_{ep} – грузовместимость судна, м³;

γ_{ep} – удельно-погрузочная кубатура, м³/т;

v_s – скорость хода судна, уз.;

R – дальность плавания, мили;

τ – автономность плавания, сут;

C_A – адмиралтейский коэффициент;

R_x –сопротивление судна, кН;

C_{mn} – коэффициент, определяемый по данным близких судов-прототипов;

η_H – коэффициент Нормана;

ζ – безразмерный коэффициент полного сопротивления судна, зависящий от формы обводов судна, числа Фруда и числа Рейнольдса;

ρ – плотность морской воды, кг/м³;

S_f – площадь смоченной поверхности, м²;

S_{mid} – площадь мидель-шпангоута, м²;

EPS – буксировочная мощность, кВт;

C_e – адмиралтейский коэффициент буксировочной мощности;

Fr – число Фруда;

Re – число Рейнольдса;

$\zeta_{ост}$ – коэффициент остаточного сопротивления судна;

ζ_f – коэффициент трения судна;

ν – коэффициент кинематической вязкости;

η_o – пропульсивный коэффициент;

n_s – коэффициентом энерговооруженности судна, кВт/кН;

η_s – величина удельных затрат энергии, кВт/т уз,

η_e – коэффициент утилизации водоизмещения судна по грузоподъемности;

η_{DW} – коэффициент утилизации водоизмещения по дедвейту.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	10
Раздел I. Общие задачи и методы проектирования судов.....	12
1.1. Задачи курса «Основы проектирования судов и плавучих сооружений».....	12
1.2. Основные качества судна. Классификация искомых и заданных величин.....	15
1.3. Метод последовательных приближений как основной метод проектирования судов.....	19
1.4. Выбор архитектурно-конструктивного типа морского судна.....	25
1.4.1. Исходные положения.....	25
1.4.2. Требования к архитектурно-конструктивным типам морских судов.....	29
1.4.3. Архитектурно-конструктивные типы пассажирских и грузопассажирских морских судов.....	32
1.4.4. Архитектурно-конструктивные типы морских грузовых судов.....	39
1.5. Контрольные вопросы.....	60
1.6. Основные термины и понятия.....	60
Раздел II. Методы определения основных элементов проектируемого судна в первом приближении.....	61
2.1. Общие соображения и постановка задачи.....	61
2.2. Уравнение мощности и его разновидности.....	64
2.2.1. Определение мощности энергетической установки по двухкомпонентным формулам в функции Δ и v_s	64
2.2.2. Энерговооруженность морских судов.....	76
2.2.3. Удельные затраты энергии на движение морских судов.....	79
2.3. Уравнение весов и его разновидности.....	84

2.3.1. Общее понятие о нагрузке судна.....	84
2.3.2. Уравнение весов, выраженных в функции водоизмещения.....	91
2.3.3. Коэффициент утилизации водоизмещения.....	92
2.3.4. Кубическое уравнение весов.....	93
2.3.5. Квадратное уравнение весов	96
2.3.6. Дифференциальное уравнение весов	98
2.3.7. Подбор судов-прототипов при определении водоизмещения проектируемого судна.....	108
2.3.8. Особенности определения водоизмещения при проектировании малых морских судов.....	111
2.4. Уравнение объемов, составляющих кубатуру судна.	
Разработка эскизов общего расположения проектируемого судна.....	118
2.4.1. Полная теоретическая вместимость судна.....	118
2.4.2. Уравнение объёмов, составляющих кубатуру судна.....	121
2.4.3. Разработка эскизов общего расположения проектируемого судна.....	125
2.4.4. Размещение и оборудование жилых и общественных помещений.....	128
2.4.5. Помещения для экипажа.....	131
2.4.6. Помещения для пассажиров.....	136
2.4.7. Кладовые для хранения провизии.....	137
2.4.8. Помещения медицинского назначения.....	138
2.4.9. Санитарно-гигиенические помещения для экипажа и пассажиров.....	138
2.4.10. Вестибюли, коридоры, трапы.....	141
2.5. Контрольные вопросы.....	143
2.6. Основные термины и понятия.....	143

Раздел III. Методы определения главных размерений проектируемого судна.....	144
3.1. Определение главных размерений проектируемого судна заданного водоизмещения.....	144
3.2. Дифференциальное уравнение И.Г. Бубнова.....	147
3.2.1. Дифференциальное уравнение плавучести.....	147
3.2.2. Дифференциальное уравнение весов	147
3.2.3. Уравнение И.Г. Бубнова.....	148
3.3. Выбор соотношений главных размерений и коэффициентов полноты корпуса проектируемого судна.....	148
3.3.1. Выбор относительной длины проектируемого судна.....	149
3.3.2. Выбор соотношений главных размерений проектируемого судна.....	150
3.3.3. Выбор коэффициентов полноты корпуса проектируемого судна.....	153
3.4. Влияние главных размерений и коэффициентов полноты корпуса на характеристики начальной остойчивости проектируемого судна..	155
3.4.1. Поперечная метацентрическая высота, как характеристика начальной остойчивости судна.....	155
3.4.2. Уравнение начальной остойчивости в алгебраической форме.....	157
3.4.3. Уравнение начальной остойчивости в дифференциальной форме.....	162
3.4.4. Уравнение начальной остойчивости при аффинных преобразованиях теоретического чертежа.....	163
3.5. Влияние главных размерений и коэффициентов полноты корпуса на характеристики диаграммы статической остойчивости проектируемого судна.....	163

3.5.1. Оценка остойчивости при проектировании морских судов.....	163
3.5.2. Анализ остойчивости неповрежденных малых морских судов.....	170
3.5.3. Постановка задачи повышения остойчивости малых морских судов.....	177
3.5.4. Пересчёт диаграммы статической остойчивости судна-прототипа при аффинных преобразованиях теоретического чертежа.....	179
3.5.5. Пересчёт диаграммы статической остойчивости дифференциальным методом при изменении коэффициентов полноты корпуса судна.....	181
3.6. Влияние главных размерений и коэффициентов полноты корпуса на характеристики вместимости проектируемого судна.....	188
3.6.1. Уравнение вместимости В.Л. Поздюнина.....	188
3.6.2. Уравнение вместимости В.В. Ашика.....	190
3.6.3. Уравнение вместимости сухогрузных судов со средним расположением машинного отделения Л.М. Ногида.....	195
3.6.4. Уравнение вместимости для судов с двойными бортами и лесовозов, несущих палубный груз.....	199
3.6.5. Уравнение вместимости для сухогрузных судов, с кормовым и промежуточным расположением машинного отделения. Удифференровка судна.....	200
3.6.6. Уравнение вместимости для наливных судов.....	205
3.7. Влияние главных размерений и коэффициентов полноты корпуса судна на характеристики балластировки и удифференровки морских судов.....	207
3.7.1. Исходные положения.....	207
3.7.2. Рациональные границы балластировки судна с целью	

повышения начальной остойчивости.....	209
3.7.3. Балластировка судов для регулирования их остойчивости и посадки.....	211
3.7.4. Требования к посадке судов в полном грузу и при ходе в балласте.....	215
3.8. Контрольные вопросы.....	221
3.9. Основные термины и понятия.....	222
Заключение.....	223
Библиографический список.....	224

ВВЕДЕНИЕ

Судно – это сложное инженерное сооружение, основными этапами создания которого, являются его проектирование и постройка. Задача проектирования морского судна заключается в разработке его чертежей и выполнении расчетов так, чтобы судно наилучшим образом отвечало всем требованиям, предъявляемым к нему его целевым назначением.

Учебная дисциплина «Основы проектирования судов и плавучих сооружений» изучает вопросы, связанные с определением основных характеристик и элементов проектируемых судов в их общем виде.

Первая часть курса «Определение основных элементов и главных размерений проектируемого судна» является обязательной составной частью курсового и дипломного проектирования, поэтому цель настоящего учебного пособия состоит в изложении не только вопросов теории проектирования судов, но также и методических приемов, связанных с выполнением курсовых и дипломных проектов. В курсе проектирования судов студент впервые сталкивается с необходимостью ставить решение задач теории корабля или строительной механики корабля в зависимость от решения задач технологии судостроения, экономики, судовой энергетики, охраны труда и других дисциплин, подчиняя совместное решение всех этих задач единой функции цели.

Сравнивая эту задачу с задачами других специальных судостроительных дисциплин, отметим, что последние занимаются анализом отдельных качеств судна, в то время как проектирование судов имеет дело с их синтезом, т.е. с обеспечением различных качеств в едином инженерном сооружении. Такая задача намного сложнее задач анализа, т.к. требования к различным качествам противоречивы.

Одной из главных задач проектирования является умение правильно разрешить эти противоречия и отыскать наиболее удачный, оптимальный вариант.

Издание учебного пособия должно оказать помощь студентам в закреплении знаний, получаемых в аудитории, как дополнительный источник информации, а также при выполнении дипломных проектов и выпускных работ магистров.

Постоянное внимание при подготовке рукописи к изданию оказывал ее научный редактор В.П. Комаров, доктор технических наук, профессор кафедры № 12 Севастопольского военно-морского института им. П.С. Нахимова.

Полезные замечания высказал заведующий кафедрой Океанотехники и кораблестроения, доктор технических наук, профессор Ю.Г.Ожиганов, что позволило авторам более полно осветить ряд вопросов и систематизировать материал.

Авторы выражают признательность рецензентам В.А. Некрасову, доктору технических наук, профессору, заведующему кафедрой "Теории и проектирования судов" Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова; Н.А. Грекову, доктору технических наук, старшему научному сотруднику МГИ НАН Украины, взявшим на себя труд прочитать рукопис, высказать полезные замечания и дать положительные рецензии.

РАЗДЕЛ I. ОБЩИЕ ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДОВ

1.1. Задачи курса «Основы проектирования судов и плавучих сооружений»

При проектировании любого сложного сооружения проектант сталкивается со многими противоречиями, и одной из главных задач проектирования является умение правильно их разрешить и отыскать наиболее удачный, оптимальный вариант.

Так, профессор И.Г.Бубнов писал: «Задача проектирования судна заключается в составлении таких чертежей его и описаний, чтобы построенное по ним судно удовлетворяло всем заданиям и требованиям, положенным в основу составления проекта. Такими заданиями для коммерческого судна являются, например, грузоподъемность, род перевозимого груза, объем пассажирских помещений, скорость, район плавания, род топлива, достаточная прочность всех частей судового корпуса, надлежащая остойчивость и мореходные качества, и многое другое» [9].

Академик В.Л. Поздунин указывал: «Поскольку задача проектирования судна должна получить однозначное решение, среди всех возможных решений задачи или возможных вариантов должен быть произведен отбор оптимального решения или варианта» [51].

Профессор В.А. Некрасов также указывает: «Обобщенными целями проектирования судна, как известно, является обеспечение его эффективности и безопасности плавания на комплексе возможных функциональных операций, соответствующих назначению. Достигаются эти цели, в основном, путем рационального выбора главных элементов, сообщающих характеристикам мореходных качеств судна, таким как плавучесть, остойчивость, непотопляемость, ходкость, управляемость и собственно мореходность, необходимые значения. Поэтому на ранних стадиях задача проектирования

формулируется как задача поиска экстремума некоторой целевой функции, представляющей комбинацию показателей функциональной и экономической эффективности судна, при наличии различных ограничений на его мореходные качества» [42].

Профессор А.В. Бронников подразделяет задачу проектирования судна на два уровня. «**Задача верхнего иерархического уровня, или внешняя задача теории проектирования судов**, заключается в разработке вопросов, связанных с определением характеристик судов, указываемых в заданиях на их проектирование (задача по разработке технического задания), а также в установлении общих требований, предъявляемых проектируемым судам. **Задача нижнего иерархического уровня, или внутренняя задача теории проектирования судов**, охватывает вопросы, связанные с определением элементов проектируемых судов (задача по разработке проекта).

Внутреннюю задачу теории проектирования судов подразделяют также на два уровня: верхний, связанный с определением основных элементов проектируемого судна, и нижний, на котором рассматриваются вопросы архитектурно-конструктивного оформления, оборудования и общего расположения судов » [6].

Профессор Томас К. Гилмер в работе «Проектирование современного корабля» уточняет: Проектирование корабля, как и всякое проектирование, предполагает наличие творческого замысла, его развитие и осуществление. Понятие «проектирование» имеет много значений и интерпретаций. Даже в профессиональной среде термин «проектирование» неоднозначен. Например, инженер-исследователь и инженер-конструктор в равной мере считают свою деятельность проектированием. Создание математических моделей также относят к категории проектирования. Специалисты по анализу систем называют разработку своих диаграмм проектированием функциональных схем. Инженеры-технологи в той или иной степени также участвуют в проектировании, что на практике приводит к улучшению ко-

нечного продукта производства. Однако в более традиционном представлении проектирование по-прежнему следует рассматривать как единый творческий процесс, развивающийся от первоначального замысла до его осуществления. В этом процессе может участвовать либо один человек, либо коллектив людей, обладающих различными способностями. В любом случае проектирование должно представлять собой единый процесс, цель которого – выразить и передать строителю основной замысел, каким бы простым или сложным он не был» [23].

Итак, задача проектирования судна заключается в разработке его чертежей и описаний в таком объеме и качестве, чтобы судно наилучшим образом отвечало всем требованиям, предъявляемым к нему, согласно его целевому назначению.

Сравнивая эту задачу с задачами других специальных судостроительных дисциплин, отметим, что последние занимаются анализом отдельных качеств судна, в то время как проектирование судов имеет дело с их синтезом, т.е. с обеспечением различных качеств в едином инженерном сооружении.

Сложность этой задачи значительно выше сложности задач анализа хотя бы потому, что требования к различным качествам судна весьма противоречивы. Так, например, длину судна желательно, с точки зрения общей продольной прочности, принимать минимальной, а с точки зрения устойчивости судна на курсе, наоборот – максимальной. Или, стремясь повысить остойчивость судна, мы обычно увеличиваем его метацентрическую высоту, а значит, одновременно при этом ухудшаем параметры качки.

В курсе проектирования судов студент впервые сталкивается с необходимостью ставить решение задач теории корабля или строительной механики корабля в зависимость от решения задач технологии судостроения, экономики, судовой энергетики, охраны труда и других дисциплин, подчиняя совместное решение всех этих задач единой функции цели.

Подчеркнем, что теория проектирования судов тесно связана с другими специальными судостроительными дисциплинами, но сохраняет при этом присущий ей научный характер. Так, например, теория корабля решает прямую задачу о мореходных качествах *судна заданных размеров и формы*. Теория же проектирования судов решает обратную комплексную задачу о размерах и форме судна, соответствующих заданным мореходным качествам. Строительная механика корабля занимается задачей обеспечения прочности *корпуса судна заданных размеров и определенной конструктивной схемы*. Теория же проектирования судов решает обратную задачу об определении размеров, конструктивной схемы, материала корпуса судна и т.п., исходя из норм прочности.

К другой группе задач теории проектирования судов относятся задачи нормативного характера: нормирование нижнего и верхнего предела остойчивости, нормирование непотопляемости, надводного борта, разработка норм прочности и т.д.

1.2. Основные качества судна. Классификация искомых и заданных величин

К основным качествам коммерческого судна отнесем эффективность его работы при его использовании по целевому назначению, а также безопасность работы и плавания. Каждое коммерческое промышленное предприятие, в том числе и коммерческое судно, реализуя изготовленную им продукцию, должно покрывать доходами от реализации продукции свои расходы на ее производство и сбыт, получая при этом прибыль. Превышение доходов над расходами соответственно характеризует рентабельность (доходность) предприятия. Отметим, рентабельность предприятия является обобщающим показателем экономической эффективности его работы за определенный период времени. К основным качествам судна следует также отнести реальность его постройки.

Безопасность работы и плавания морского судна обеспечивается: хорошими мореходными качествами; достаточной прочностью; насыщением надежной навигационной и гидроакустической аппаратурой; надежными и экономичными двигателями, а также долговечностью и надежностью службы конструкций и т.д.

Необходимо помнить, что *главным основным качеством проекта судна* является реальность постройки будущего судна.

К факторам, подлежащим обязательному учету при проектировании судна относятся:

- технико-экономические условия эксплуатации, обуславливающие безопасность, эффективность и рентабельность судна при эксплуатации;
- технико-экономические условия производства, обеспечивающие конкурентоспособность и уровень стоимости постройки судна.

Классическим примером недоучета первого условия можно считать постройку парохода «Грейт Истерн». Так при проектировании и постройке английского парохода «Грейт Истерн» не были учтены технико-экономические условия его эксплуатации, хотя этот пароход проектировался и строился под руководством знаменитого и талантливой инженера Брумеля. Пароход водоизмещением 27400 т, длиной 207 м, шириной 25,5 м, высотой борта 17,7 м и осадкой 7,8 м имел огромную пассажировместимость 4000 человек и грузоподъемность 6000 т при скорости хода 14 уз. В то же время паровая машина судна имела мощность 8400 л.с. и работала при давлении пара всего лишь в 1,4 атм., т.е. крайне неэкономично. Но самое главное заключалось в том, что интенсивность грузопотоков и пассажиропотоков того времени совершенно не соответствовали его эксплуатационным характеристикам. Поставленный на трансатлантическую линию этот пароход не имел необходимой загрузки, т.к. в 1859 г. (год окончания постройки парохода) еще отсутствовала необходимость в обеспечении столь значительных грузо- и пассажиропотоков. После ряда неудачных по-

пытках использовать его для других целей, пароход в 1888 году был продан на слом. Убыток от его эксплуатации составил свыше 1 миллиона фунтов стерлингов, хотя само судно являлось вершиной развития уровня техники своего времени. На нем впервые в металлическом судостроении была применена продольная система набора корпуса. Заметим, что следующие суда подобных размеров были построены лишь через 50 лет: лайнер «Кайзер Вильгельм II» (Германия, 1902 г.) и лайнер «Мавритания» (Англия, 1906 г.).

Важность учета технико-экономических условий производства можно показать на примере японской судостроительной промышленности. Япония в 60-70 гг. XX столетия, после второй мировой войны, провела реконструкцию своих лучших судостроительных предприятий, что позволило существенно снизить трудоемкость постройки судов, а соответственно уменьшить до 30% стоимость продажи судов. Это поставило Японию вне конкуренции на международном рынке и обеспечило устойчивый портфель заказов судостроительным предприятиям на длительный период времени. Отметим, что возрастающая конкурентная борьба на международном рынке требует все более серьезных мер по повышению технологичности постройки судов, по снижению трудоемкости их постройки, а также сокращения продолжительности постройки судов, что, в конечном счете, позволит снизить строительную стоимость судов и повысит конкурентоспособность судостроительных предприятий.

Рассмотрим классификацию искомых и заданных величин, предложенную академиком В.Л. Поздюниным [51]. В число искомых и заданных величин, характеризующих в общем случае основные качества судна, как сложного инженерного сооружения, обладающего необходимой плавучестью, заданной вместимостью и заданной ходкостью, входят:

Δ – весовое водоизмещение судна, кН;

W – кубатура судна, м³;

N_e – мощность главных механизмов, кВт;

В задаче проектирования судов они, как правило, являются неизвестными, причем каждая из этих величин является в свою очередь также функцией целого ряда как неизвестных, так и известных величин. Назовем эти величины **главными обобщенными неизвестными** в задачах проектирования судов. Весьма часто главные обобщенные неизвестные Δ , W и N_e рассматриваются как функции следующих величин:

1) главных размерений судна L , B и D , т.е. длины, ширины и высоты борта судна, а также эксплуатационного измерителя в виде осадки судна d , а также коэффициента полноты корпуса судна C_b , являющихся в задачах проектирования обычно неизвестными величинами. Будем в дальнейшем называть эти величины **частными неизвестными**.

2) **известных** или **заданных** величин и элементов, которые мы можем отнести к разряду независимых переменных. Заданные величины, как следует из самого их названия, известны проектанту из технического задания на проектирование судна, или же могут быть однозначно определены по данным технического задания. К ним относятся: вес полезного груза или грузоподъемность $P_{гр}$, кН; количество пассажиров $n_{пас.}$; грузовместимость судна $V_{гр}$, м³; удельно-погрузочная кубатура $\gamma_{гр}$, м³/т; скорость хода судна v_s , уз.; дальность плавания R , мили; автономность плавания τ , сут и др.

3) **нормативов** или **условно известных** величин, к числу которых относятся: нормативы площадей; объемные, весовые и прочие нормативы; эмпирические коэффициенты в виде нормы расхода топлива, воды, смазки и провизии и т.п.

4) параметров или **условно независимых** переменных, выбираемых проектантом до известной степени произвольно, а именно: архитектурный тип судна; количество надстроек; общее расположение; общая конструктивная схема корпуса; соотношения главных размерений; коэффициенты полноты корпуса и т.д.

1.3. Метод последовательных приближений как основной метод проектирования судов

С математической точки зрения для однозначного определения интересующих нас неизвестных величин следует составить такое число уравнений, которое равнялось бы числу неизвестных величин.

Однако по данным, вытекающим из технического задания на проектирование судна, составить такое необходимое количество уравнений практически невозможно, либо эти уравнения будут иметь сравнительно низкую точность, и при совместном решении могут быть получены совершенно неудовлетворительные результаты. Поэтому для упрощения решения принято подразделять задачу нахождения главных и второстепенных неизвестных величин на два этапа:

первый этап – определение обобщенных неизвестных;

второй этап – определение частных неизвестных.

Задача нахождения неизвестных величин является в этом случае многозначной, поэтому в процессе разработки проекта часто возникает необходимость сопоставить ряд вариантов решения этой задачи. В таких случаях целесообразно рассматривать близкие к проектируемому судну реальные суда в качестве судов-прототипов. Очевидно, чем ближе к проектируемому судну будет подобрано реальное судно-прототип, тем меньшие между ними будут отклонения или расхождения по основным характеристикам. При определенных условиях многие технико-экономические показатели судна, соответствующие сопоставимым вариантам, могут быть получены путем простейших пересчетов по судну-прототипу, это в значительной степени упрощает решение ряда задач в начальной стадии проектирования. Формулы пересчета характеристик с судна-прототипа на проектируемое судно представляют при этом несомненную ценность и потому, что они дают определенное представление о влиянии изменения главных размерений судна на его технико-экономические показатели и, следо-

вательно, заранее ориентируют проектировщика, в каком направлении следует развивать проект.

Задачи, возникающие при пересчетах по прототипу, могут быть разбиты на два класса.

К первому классу относятся задачи, которые решаются в предположении, что сопоставляемые суда подобны. В зависимости от постановки задачи в этом случае могут быть использованы геометрическое или механическое подобие. Кроме того, для некоторых задач, связанных с формой обводов корпуса судна, применяется метод аффинных преобразований, при котором масштабы изменения размеров по длине, ширине и высоте могут быть различными. Учитывая, что обычно размеры подобранных сопоставляемых судов мало отличаются друг от друга, часто для приближенного определения интересующих величин используют закономерности теории подобия и размерностей. Погрешности определения величин при этом обычно не должны выходить за допустимые пределы.

Ко второму классу относятся задачи, которые решаются в предположении, что сопоставимые суда имеют между собой определенные различия и не подчинены законам подобия. В этом случае проектировщикам приходится определять степень отклонения того или другого параметра по сравнению с судном-прототипом.

Задачи первого класса чаще всего решаются алгебраическими методами. Задачи второго класса обычно решаются методами дифференциального исчисления.

Проектирование судов относится к числу весьма сложных инженерных задач. Поэтому основным методом проектирования судов, так же как и для многих других сложных плавучих и береговых инженерных сооружений, является *метод последовательных приближений*, сущность которого заключается в том, что весь процесс проектирования разбивается на

ряд последовательных стадий. Составляя вместе одно неразрывное целое, каждая последующая стадия расширяет и уточняет данные, полученные при выполнении предыдущей, а также расширяет круг подлежащих учету требований. Несмотря на это, каждая последующая стадия имеет свою вполне определенную целевую установку и в этом смысле представляет вполне законченный раздел проекта [51].

Процесс проектирования чаще всего разбивается на следующие четыре стадии: составление технического задания на проектирование судна; эскизное проектирование; техническое проектирование и разработка рабочих чертежей.

Главной задачей технического задания на проектирование судна является задача обеспечения эффективности и рентабельности работы будущего судна. При разработке технического задания должны быть установлены и обоснованы с технико-экономической точки зрения все основные характеристики, а также ограничения главных размеров будущего судна.

К основным, относятся такие характеристики, которые определяют все будущие эксплуатационные качества и должны пройти красной нитью через все стадии проектирования. Сюда следует отнести:

- а) назначение судна;
- б) район плавания;
- в) скорость хода;
- г) грузоподъемность или грузовместимость;
- д) продолжительность рейса или дальность плавания;
- е) количество экипажа;
- ж) тип технологического оборудования и т. д.

Из ограничений главных размерений судна в техническое задание следует вносить только те, которые являются следствием местных условий эксплуатации, либо постройки судна, а поэтому не могут быть учтены проектантами. К таким ограничениям можно отнести, например:

1. Ограничение осадки судна, исходя из глубины акватории будущего порта приписки судна.

2. Ограничение ширины или длины судна, исходя из размеров каналов, шлюзов, а также пролетов цехов завода-строителя или размеров судоподъемных средств при ремонте и т. п.

В техническом задании должны быть приведены общие пожелания в отношении проектируемого объекта и указаны требования технологического характера. В состав технического задания должны войти экономическое обоснование проекта и технико-экономическое сравнение ряда вариантов, на основании анализа этих данных должен быть выбран оптимальный, наиболее эффективный вариант судна. Поэтому при составлении технического задания приходится определять в первом приближении главные размерения и элементы судна. Кроме того, в техническом задании целесообразно составить эскизы общего расположения проектируемого судна. Эти главные размерения и эти эскизы, не являясь обязательными для проектантов следующих стадий, могут отчасти упростить их работу, а главное, подчеркивают основные пожелания заказчика.

Иногда составление и сравнение вариантов проектируемого судна выделяется в особую стадию, называемую предэскизным проектом. Техническое задание должно быть достаточно полным и в то же время не должно стеснять творческую мысль конструктора, поэтому в него не следует вносить лишние, надуманные требования и ограничения.

Основной целью разработки эскизного проекта судна является обеспечение будущему судну безопасности плавания и реальности его постройки. Эскизный проект выполняется по одному выбранному варианту. Выполнение его в нескольких вариантах указывает на недостаточную проработку технического задания и ведет к потере времени и удорожанию проекта. В эскизном проекте должны быть решены все принципиальные вопросы по выбранному варианту, прежде всего: водоизмещение, архитек-

турный тип судна, форма корпуса, вместимость, мощность главных двигателей, главные размерения, планировка общего расположения, деление на непроницаемые отсеки, принципиальная схема технологической линии и т.п. Такие элементы, как главные размерения, теоретический чертеж, мощность главных двигателей должны быть установлены в эскизном проекте окончательно, на основании соответствующих расчетов.

Эскизный проект должен дать достаточные и достоверные данные относительно водоизмещения судна и координат его центра тяжести. Важность этого момента подчеркивается здесь намеренно, так как водоизмещение и положение центра тяжести судна оказывают весьма сильное влияние на большинство мореходных качеств судна. Эскизный проект должен дать достаточный материал для обсуждения всех деталей будущего судна. При обсуждении эскизного проекта не должно быть таких принципиальных вопросов, на которые проектант не мог бы дать исчерпывающего ответа. Этим определяется и объем эскизного проекта, он не должен быть мал, но не следует, и доводить его до объема технического проекта.

Целью технического проекта является разработка полного комплекта чертежей и спецификаций, а также расчётов, используемых в последующем при разработке рабочих чертежей. Естественно, что эта документация разрабатывается более подробно, чем документация, выполненная на стадии эскизного проекта [8].

В техническом проекте все основные вопросы должны быть решены не только принципиально, но и конструктивно, так, чтобы после его выполнения можно было приступить к изготовлению рабочих чертежей. Кроме того, в процессе технического проектирования должны быть составлены ведомости и технические условия для заказа всех материалов, изделий и контрагентских поставок, необходимых для постройки судна. Для судов серийной постройки разрабатывается также принципиальная технология постройки судна, с учетом оборудования завода-строителя, а

также необходимые экономические расчеты по постройке судна. Поэтому технический проект должен быть значительно шире эскизного в графическом отношении.

В технический проект должны быть внесены все изменения и улучшения, необходимость в которых выявилась в процессе рассмотрения и согласования эскизного проекта, а также учтены все те второстепенные требования, которые были опущены при составлении эскизного проекта.

Технический проект заканчивается разработкой контрактной документации, на основании которой может быть заключен контракт на постройку судна с фирмой-строителем. После заключения контракта дальнейшее проектирование (разработка рабочих чертежей) производится в основном фирмой-строителем. Рабочая конструкторская документация должна содержать все необходимые данные как для изготовления отдельных деталей, так и для сооружения судна в целом.

Бурное развитие информационно-вычислительной техники оказало весьма значительное влияние на технологический процесс проектирования судов. Если в начальном периоде развития ПЭВМ перед проектантами стояла задача освобождения от выполнения трудоемких судостроительных расчётов, то вследствие быстрого совершенствования вычислительной техники, возможности которой постоянно расширяются, проектант, соответственно, имеет возможность находить все новые аспекты применения современных вычислительных программ.

Одной из первых комплексных программ автоматизированного проектирования судов была созданная в Испании система «Форан», которая позволила быстро и эффективно выполнить судостроительные проектные работы и нашла широкое распространение в конструкторских бюро. Особо ценная отличительная особенность системы – ***интеграция процессов проектирования и постройки судна***. Система «Форан» имела модуль генерации теоретического чертежа, позволяющий создавать новые обводы кор-

пуса проектируемого судна, используя в качестве исходной информации коэффициенты формы корпуса.

Дальнейшее развитие применения информационно – вычислительной техники идет по двум основным направлениям:

- расширение и повышение точности решения задач по теории корабля, прочности, экономике, конструкции судов и т.п.;
- создание и расширение систем автоматизированного проектирования и постройки судов.

Таким образом, применение информационно – вычислительной техники привело к существенной корректировке вышеизложенного метода последовательных приближений при проектировании судов. Во-первых – существенно сократились сроки выполнения отдельных стадий, а также и всего проекта судна в целом. Во-вторых – появилась возможность многовариантной проработки, как отдельных разделов, так и всего проекта в целом. В-третьих – совершенствование отдельных программ позволяет существенно повысить точность расчетов. В-четвёртых – появилась возможность при обсуждении контракта с заказчиком быстро производить прикидочные расчёты с весьма высокой точностью.

1.4. Выбор архитектурно- конструктивного типа морского судна

1.4.1. Исходные положения

При выборе архитектурно-конструктивного типа проектируемого судна необходимо определить те характеристики и параметры судна, совокупность которых, в конечном счете, и будет составлять архитектурно-конструктивный тип судна. Характеристики и параметры судна при этом устанавливают, рассматривая и сопоставляя их достоинства и недостатки, и выбирая решения, наиболее целесообразные для данного типа судна [32].

Ввиду сложности задачи, процесс выбора архитектурно-конструктивного типа подразделяется обычно на два приближения или этапа.

На первом этапе обычно рассматриваются те задачи, решение которых учитывают при составлении уравнения весов. К таким задачам относятся: выбор положения машинного отделения по длине судна, наличие палубного груза на лесовозах и контейнеровозах, ориентировочное количество палуб на универсальных грузовых судах, тип грузовых цистерн на судах-газовозах, тип промысловых устройств и грузовых мачт на рыбопромысловых судах, наличие или отсутствие грузового устройства на специализированных контейнеровозах и судах для перевозки массовых грузов, наличие мощных конструкций антенных систем на судах космической службы, а также установление конструктивного типа судна [7].

К числу функциональных признаков архитектурно-конструктивного типа пассажирских судов также относятся: наличие удлиненного бака, тип грузовых помещений, число водонепроницаемых переборок, положение палубы переборок, число жилых палуб под палубой переборок, число и высота ярусов надстройки, развитие надстроек и рубок [10].

На основе полученных главных размерений проектируемого судна на втором этапе разрабатывают структурную схему общей компоновки помещений на судне, проверяют и, если требуется, корректируют принятые на первом этапе данные, решают также другие, более частные вопросы, связанные с архитектурно-конструктивным типом: формой оконечностей корпуса судна, количеством и типом надстроек и рубок, грузовыми люками на верхней палубе судна, грузовыми лацпортами и т.д. [7]. На рисунке 1.1 приведены наиболее характерные формы оконечностей морских судов [32].

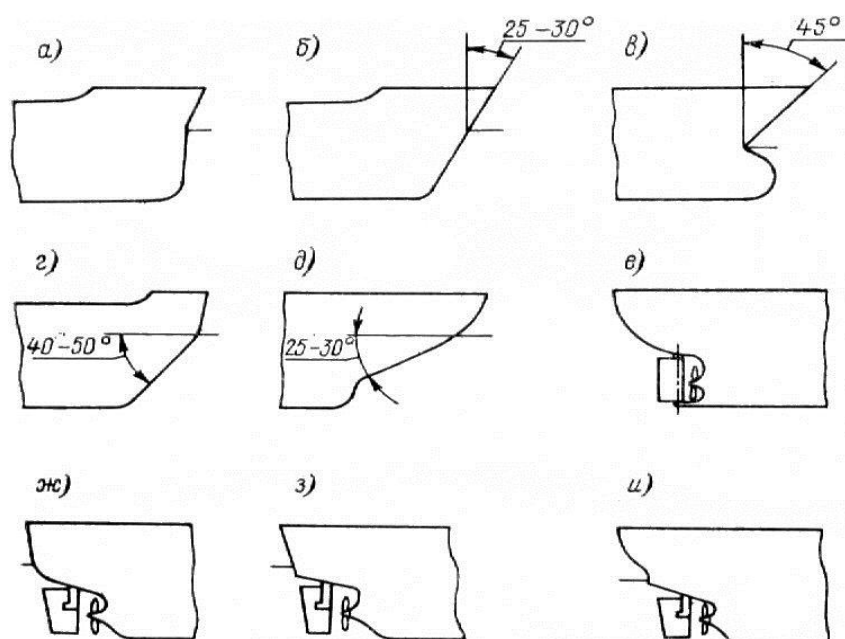


Рисунок 1.1 – Характерные формы оконечностей морских судов:

а – вертикальный цилиндрический форштевень; *б* – наклонный форштевень; *в* – наклонный форштевень, сочетающийся с носовым бульбом; *г* – полуледокольная форма носовой оконечности; *д* – нос ледокола, *е* – крейсерская корма; *ж* – крейсерская корма, сочетающаяся с транцем в надводной части, *з* – транцевая корма; *и* – корма с транцем в районе ватерлинии

Обычно в силуэте бокового вида судна рассматриваются два основных контура: главный и бортовой контуры (рисунок 1.2). **Главным** называется контур в диаметральной плоскости судна. Он объединяет силуэт корпуса судна с форштевнем, ахтерштевнем и линией палубы, а также надстройки, трубы, мачты и другие, меньшие по величине элементы. Этот контур является определяющим для гармоничного и динамичного выражения силуэта судна, особенно для пассажирского. Выражение динамичности силуэта судна можно обеспечить некоторым смещением его визуального центра в направлении движения судна, т.е. другими словами, выдвиганием в нос особо заметных элементов надстроек, труб и т.п. При этом следует подвести их под **линию архитектурной динамичности**, отображаю-

щую общее направление линии обтекаемости от носовой оконечности судна к кормовой и являющуюся условной линией, огибающей верхнюю часть силуэта.

Бортовой контур является проекцией борта корпуса, надстроек, иллюминаторов и т.п. на диаметральную плоскость судна (заштрихованная площадь, рисунок 1.2) и является первым планом по отношению к главному контуру.

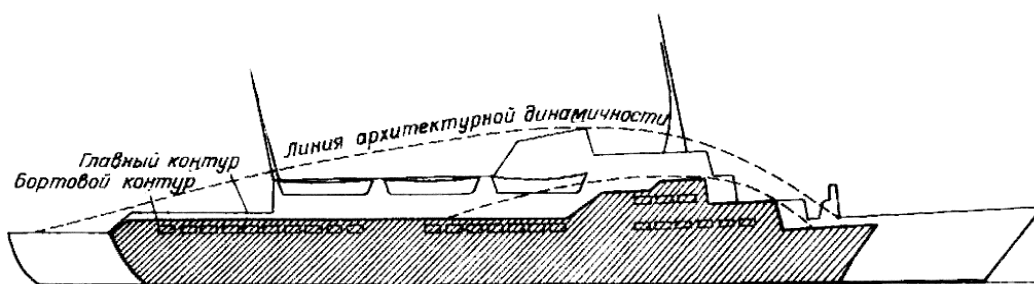


Рисунок 1.2— Главный (охватывающий весь силуэт) и бортовой (заштрихованная площадь) контуры

Нижней границей как главного, так и бортового контура, является ватерлиния. Эта часть бокового вида особенно заметна с берега и в перспективе, поэтому должна формироваться особенно внимательно [62].

Суда с машинным отделением в средней части корпуса судна имеют обычно визуальный центр, расположенный в нос от мидель-шпангоута, что придает им соответствующее выражение динамичности. В тоже время, у судов с машинным отделением, расположенным в кормовой части корпуса, визуальный центр лежит в корму от мидель-шпангоута, поэтому их силуэт недостаточно динамичен. Особенно это касается грузовых судов, здесь функциональное назначение судна просто не дает возможности формировать силуэт иначе.

В процессе разработки принципиальной структурной схемы общего расположения на пассажирских судах необходимо также учитывать следующие общие рекомендации. Так, комплекс общественных помещений жела-

тельно формировать в кормовой части судна по вертикальной схеме (одно над другим). Такое решение позволяет в значительной степени изолировать жилые помещения пассажиров и экипажа от источников повышенной шумности, каковыми являются рестораны, музыкальный салон, диско-клубы, игротеки и др. Машинно-котельное отделение при кормовом расположении общественных помещений необходимо располагать таким образом, чтобы шахта МКО не проходила через них. Кормовой лифтовый ствол при этом целесообразно совмещать с носовой стенкой шахты МКО [10].

После разработки и принятия основных решений, а так же их графического оформления в виде принципиальной структурной схемы общей компоновки помещений, эта структурная схема далее является основным направляющим и координирующим документом в процессе разработки чертежей общего расположения проектируемого судна.

1.4.2. Требования к архитектурно-конструктивным типам морских судов

Архитектурный тип судна характеризуется следующими основными факторами: количеством палуб, трюмов и люков, положением машинного отделения, типом и размером надстроек и рубок на верхней палубе, формой оконечностей. При обосновании принимаемых решений по архитектурному типу судна прежде всего учитывается функциональное назначение судна, включая в это понятие также и характеристики перевозимого груза. Кроме того, принимают во внимание требования, приводимые в техническом задании (контракте) на разработку проекта, такие как скорость, дальность, автономность и район плавания, тип главного двигателя, комплектация экипажа и др. [6].

Архитектурное проектирование морского судна является составной частью общего проектирования. Его цель – разработка требуемых материалов архитектурной части проекта, т.е. той части общепроектной докумен-

тации, которая достаточно полно характеризует архитектурное решение внешнего вида судна, общее расположение его помещений, их планировку, оборудование и уровень комфортабельности судна в целом [32].

При проектировании морских судов весьма существенное значение имеет правильный выбор конструктивного типа судна, особенно системы набора корпуса. Однако, с позиции художественного конструирования, конструктивные типы судов независимо от системы набора корпуса определяются числом и характером конструкции палуб, а также типом и расположением надстроек. Поэтому выбор конструктивного типа проектируемого морского судна заключается в решении главного вопроса о минимальном надводном борте, а для двух- и многопалубных судов – в вопросе о палубе надводного борта. Следовательно, устанавливается наиболее правильное соотношение между высотой борта и осадкой проектируемого судна. То или иное решение этого вопроса оказывает влияние на целый ряд показателей судна, определяющих как его непотопляемость, остойчивость, так и грузовместимость, степень утилизации водоизмещения по грузоподъемности и дедвейту. Для однопалубных судов, таких как танкеры, суда для перевозки массовых грузов, контейнеровозы и др., однозначно решается вопрос о выборе палубы надводного борта, т.е. палубы переборок. Решение о минимальном или избыточном надводном борте при проектировании принимают обычно на основании расчетов по определению грузовой вместимости проектируемого судна: высота борта при этом должна быть такой, чтобы обеспечивалась необходимая кубатура грузовых помещений, а у танкеров – еще и отсеков изолированного балласта. Подчеркнем, что при любых обстоятельствах надводный борт судна не должен быть меньше того, который предписывается Правилами о грузовой марке.

Для конструктивных типов судов с двумя и более палубами работа начинается с выбора палубы надводного борта, т.е. палубы, от которой отсчитывается надводный борт морского судна. Выбор производится между

верхней непрерывной палубой и палубой, расположенной непосредственно ниже нее, второй сверху. Этот выбор, не оказывая влияния на грузовместимость проектируемого судна, может существенно изменить грузоподъемность и тоннаж проектируемого судна [7].

Наиболее часто на морских судах при проектировании принимается крейсерская или транцевая корма. Причем в последние годы находит все более широкое применение крейсерская форма подводной части кормовой оконечности в сочетании с плоским срезом надводной части. Такая форма позволяет упростить технологию постройки судна и уменьшить вибрацию кормовой оконечности вследствие уменьшения длины кормового свеса. Транцевая корма характеризуется плоским срезом в подводной части, что снижает сопротивление движению судна при числах Фруда, равных 0,35–0,40. На быстроходных лайнерах транец выполнен только в районе ватерлинии. Это позволило сохранить полные обводы кормы, обеспечившие кубатуру для размещения рулевой машины и хорошо стабилизирующие продольную качку судна.

Необходимо добиваться того, чтобы носовая и кормовая оконечности судна могли гармонично сочетаться, способствуя созданию единого композиционного целого. Например, цилиндрическому вертикальному форштевню крупнотоннажного судна соответствует почти вертикальный срез надводной части кормовой оконечности. Наклонный форштевень хорошо сочетается как с крейсерской, так и с транцевой кормой. Расположение надстроек и дымовых труб естественно зависит от расположения машинного отделения по длине судна. Конструкция и высота мачт зависят как от характеристик грузовых стрел, так и от размещения на них сигнальных средств, навигационного оборудования и др. Протяженность открытых частей палуб или надстроек необходимо сочетать с размещением на них навигационного оборудования, спасательных и сигнальных средств.

В процессе разработки архитектурного типа судна конкретного назначения устанавливают:

для пассажирских судов – количество и расположение палуб, платформ и поперечных переборок; количество и расположение надстроек и рубок, состав и размещение помещений для пассажиров; состав и размещение спасательных средств [10];

для универсальных сухогрузных судов – количество и расположение палуб, платформ и поперечных переборок; тип, размеры и расположение грузовых люков, лацпортов и ворот; тип и расположение специальных грузовых помещений; тип, количество и расположение грузовых устройств [6];

для нефтеналивных судов – количество и расположение продольных и поперечных переборок; наличие двойного дна и двойных бортов; наличие сухогрузного трюма; тип грузовой системы; расположение грузового насосного отделения [35];

для рыбопромысловых судов – объекты промысла и орудия лова; районы промысла, тип и производительность технологического оборудования, состав и размещение экипажа и производственных рабочих [58].

1.4.3. Архитектурно-конструктивные типы пассажирских и грузопассажирских морских судов

Мировой пассажирский флот прежде, чем сложились условия его устойчивого роста, прошел сложный путь развития, связанный с переходом от преимущественно линейной грузо-пассажирской функции к круизной и паромной функциям организации работы флота. Основные проблемы, связанные с переориентацией на круизную форму эксплуатации, относятся к 1967-1973 г.г. В эти годы линейные пассажирские суда, *уступившие деловой пассажиропоток авиации*, были либо списаны, либо переоборудованы в круизные суда [10]. Строительство круизных судов нового поколения – *крупнотоннажных плавучих центров отдыха*, обусловило

рост валовой вместимости круизных судов и бурное развитие сферы обслуживания. Так, трансатлантический суперлайнер "Queen Mary 2" (рисунок 1.3д) имеет экипаж в количестве 1250 человек, включая обслуживающий персонал; 14 баров и 10 ресторанов, обеспечивающих питание пассажиров; 3 открытых и 2 закрытых бассейна; театр, кинотеатр и целую серию различных помещений, обеспечивающих возможность спортивных занятий и активного отдыха пассажиров.

Таким образом, крупные пассажирские суда, предназначенные для круизного плавания, превратились не только в сложные инженерные сооружения, но также стали предметом искусства и тончайшего вкуса, высочайшей комфортабельности и архитектурного творчества. На рисунке 1.3а показан трансатлантический суперлайнер "Star Princess", поражающий четкостью скрупулезной проработки всех линий силуэта и общего вида. Громадное судно как бы парит над водой, в тоже время, отражая динамичность формы и внушительность сооружения. В носовой части надстройки круизного суперлайнера "Royal Princess" (рисунок 1.3б) находится каскад ярусов надстройки с наклоном в корму, что в сочетании с оригинальным наклоном форштевня создает впечатление стремительности движения судна. Круизный лайнер "Aida", изображенный на рисунке 1.3в, имеет еще более динамичную форму за счет сглаженной формы надстроек, более острого угла наклона лобовой стенки надстройки и наклона в корму дымовой трубы. Плавные обтекаемые формы надстройки, наклон кормовой стенки надстройки в нос, смещенная и наклоненная в корму мачта придают моторной яхте (рисунок 1.3г) еще большую динамичность и устремленность в морскую даль. Круизное судно "Freedom of the Seas" – стал новшеством в конструкции круизных судов (рисунок 1.3е). Никогда ещё не было судов со столь огромными и просторными помещениями для пассажиров – гигантские прогулочные палубы и залы, просторные каюты с огромными балконами, каток и стена для скалолазания, всяческие бассейны-солярии

(они сооружены на специальных крыльях, выходящих за границы бортов, и действительно висят над водой). Судно берет на борт 4370 пассажиров и 1360 человек команды. Новое чудо света "Oasis of the Seas" – крупнейший лайнер в истории человечества (рисунок 1.3ж). Длина лайнера 361 м, ширина – 66 м, водоизмещение судна – 225000 т, оснащен 16 палубами. В 2704 каютах могут разместиться 6360 пассажиров, а экипаж составляет 2100 человек. На 16 палубах лайнера расположены 2700 просторных кают, в том числе 30 кают категории loft (двухуровневые, площадью от 51 до 141 м²) и 52 suites, а все пространство поделено на 7 тематических зон.

Упрощение формы развитых надстроек позволяет максимально использовать их внутренние объемы и пассажировместимость, не оказывая большого негативного влияния на экстерьер судна.

Крупные грузо-пассажирские суда, автомобильно-пассажирские и железнодорожно-пассажирские паромы при проектировании в значительной степени копируют наиболее красивые формы трансатлантических пассажирских лайнеров. Так, например, в серии грузо-пассажирских судов типа "Иван Франко" проектанты достаточно удачно использовали архитектурно-художественную композицию трансатлантических лайнеров. На рисунке 1.4 представлено серийное грузо-пассажирское судно "Тарас Шевченко". Однако, при эксплуатации этих судов в круизном плавании, выяснилось, что их функциональные грузовые функции были освоены незначительно, и в то же время недоиспользовались пассажиропотоки. В 1972 г. была проведена модернизация этих судов с целью расширения комплекса общественных обслуживающих помещений судна за счет значительного сокращения грузовой функции [10].



Рисунок 1.3 – Пассажирские лайнеры: а) суперлайнер "Star Princess";
 б) суперлайнер "Royal Princess"; в) лайнер "Aida"; г) моторная яхта;
 д) суперлайнер "Queen Mary 2"; е) круизное судно "Freedom of the Seas";
 ж) крупнейший лайнер "Oasis of the Seas "



Рисунок 1.4 – Грузо-пассажирское судно "Тарас Шевченко"

На рисунке 1.5 изображен боковой вид теплохода "Иван Франко" этой серии до и после переоборудования, при этом силуэт судна стал более выразительным.

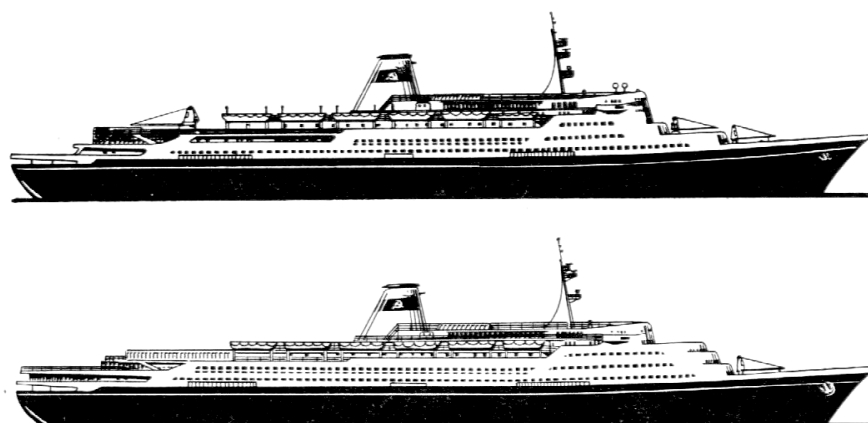


Рисунок 1.5 – Боковой вид теплохода "Иван Франко"
(вверху – до переоборудования, внизу – после него)

В 1974 – 1977 гг. по советскому заказу на верфи "Вяртсиля" в Финляндии была построена серия автомобильно-пассажирских паромов типа "Белоруссия" (рисунок 1.6). Внешний вид этих паромов удачно выражает архитектурно-художественные формы лайнеров [10]. Но при этом широкое применение обтекаемых, лекальных обводов усложняло постройку судов, повышало строительную стоимость и препятствовало использованию типовых помещений и модулей.



Рисунок 1.6 – Автомобильно-пассажирский паром
"Белоруссия"

В последние годы наметилось новое направление в архитектуре транспортных судов, выражающееся в упрощении внешних форм и очертаний судовых надстроек и рубок. Доминирующим становится стремление к простоте и целесообразности. Надстройки судов приобретают упрощенные прямоугольные (рубленые) формы, уменьшается общее количество криволинейных поверхностей. В результате существенно сокращается трудоемкость постройки судов. Кроме того, создаются условия для более рационального использования объемов помещений, а также применения модульных методов проектирования [7]. С наибольшей полнотой эти тенденции можно увидеть в проектах автомобильно-пассажирских и железнодорожно-пассажирских паромов конца XX века. На рисунке 1.7 представлен железнодорожный морской паром "Герои Севастополя", имеющий упрощенные обводы не только надстроек, но и корпуса судна.



Рисунок 1.7 – Железнодорожный морской паром "Герои Севастополя"

На рисунке 1.8 изображен скоростной автомобильно-пассажирский паром "Finnjet", валовой вместимостью 24603, длиной 200 м и эксплуатационной скоростью хода 30,5 узлов, подтверждающий новый высокий уровень технических и эстетических решений.



Рисунок 1.8 – Автомобильно-пассажирский скоростной паром "Finnjet", 1977 г

Таким образом, во внешней форме судов происходит, в известной мере, возврат к конструктивизму 20-х г.г., но, как правило, на новом техническом и эстетическом уровне, исключающем возможность повторения примитивных архитектурных решений прошлого времени.

1.4.4. Архитектурно-конструктивные типы морских грузовых судов

Значительные архитектурно-художественные изменения за последнее время произошли и с морскими грузовыми судами. На рисунке 1.9 представлены силуэты грузовых судов 20-х г.г. и 60-х г.г. XX века.

Из сопоставления их силуэтов можно сделать следующие выводы: суда 20 – 30 г.г. отличались резко очерченными угловатыми контурами, прямым вертикальным форштевнем, прямоугольными надстройками, высокими тонкими трубами и вертикальными мачтами, непосредственно стоящими на верхней палубе. Силуэты судов создавали впечатление статичности и одновременно раздробленности. Большинству же судов 60 – 80 г.г. XX в., напротив, присущи сглаженные, скругленные, обтекаемые формы надстройки, невысокие конусообразные трубы, мачты, установленные на надстройках или лебедочных рубках. Все это придавало силуэтам грузовых судов композиционное единство, известную легкость и стремительность [6].

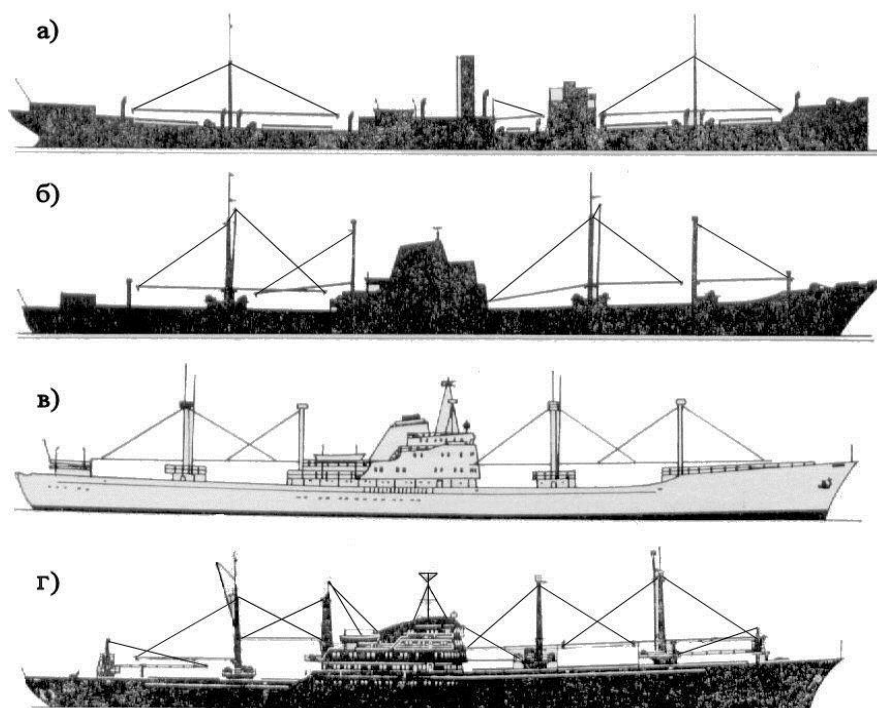


Рисунок 1.9 – Силуэты грузовых судов: а) трампы 20-х г.г. XX века, б) трампы 60-х г.г. XX века, в) грузовой лайнер 60-х г.г. XX века, г) сухогрузно-рефрижераторный лайнер, 1961 г.

Грузовые суда более поздних периодов постройки, так же как и морские паромы, все больше приобретают упрощенные формы обводов, особенно надстроек и рубок. Развитию этих тенденций способствовало и перемещение машинного отделения с накрывающим его блоком надстроек и рубок в кормовую часть судна.

Рассмотрим ряд грузовых морских судов различного целевого назначения.

Универсальные сухогрузные суда, предназначенные для перевозки генеральных грузов, составляют основу трампового флота. На рисунке 1.10 представлено современное сухогрузное судно с большим раскрытием палубы, оборудованное грузовыми кранами, с *кормовым расположением машинного отделения и надстройки*.



Рисунок 1.10 – Сухогрузное судно с кормовым расположением машинного отделения и надстройки

Грузоподъемность этих судов колеблется в широких пределах от 2 – 3 тысяч тонн у судов прибрежного плавания до 20 – 25 тысяч тонн у судов неограниченного района плавания при скорости хода от 10 до 20 узлов.

На рисунке 1.11 представлен сухогрузный теплоход типа "Кола" дедвейтом 12800 т, предназначенный для перевозки генеральных грузов, с *промежуточным расположением машинного отделения и надстройки*.



Рисунок 1.11 – Сухогрузный теплоход типа "Кола" дедвейтом 12800 т для перевозки генеральных грузов

На рисунке 1.12 изображен оригинальный сухогрузный теплоход, имеющий *кормовое расположение машинного отделения, но при этом носовое расположение надстройки.*



Рисунок 1.12 – Сухогрузный теплоход с кормовым расположением машинного отделения и носовым расположением надстройки

Итак, на современных универсальных сухогрузных судах освоено носовое, кормовое и промежуточное расположение надстройки, что и определяет соответствующий архитектурный тип судна.

Борьба за увеличение годовой провозной способности (годовой производительности) транспортных грузовых судов в настоящее время идет

по пути укрупнения грузовой единицы, т.е. за счет снижения непроизводительного стояночного времени в портах под погрузкой и выгрузкой грузов с судов. Впервые пакетный способ перевозки пиломатериалов на лесовозах был опробован в СССР (1962 г.) в Северном бассейне и с тех пор завоевал прочные позиции. Масса пакетов круглого леса размером 1400x2800 мм в зависимости от длины бревен колеблется от 6,8 т до 18,1 т, соответственно, максимальная грузоподъемность грузовых средств лесовоза ограничена величиной 25 т. Эта величина хорошо согласуется с максимальной массой груженого контейнера ISO типа TEU (24 т).

Основные требования, предъявляемые к архитектурно-конструктивному типу *лесовоза*, предназначенного для пакетных перевозок лесоматериалов, при ведении грузовых операций вертикальным способом, могут быть сформулированы следующим образом:

- раскрытие грузовых трюмов должно быть максимальным;
- конфигурация грузовых трюмов должна приближаться к параллелепипеду, что достигается размещением машинного отделения и надстройки в корме и применением двойных бортов;
- схема расположения грузовых устройств на судне и их грузоподъемность должны обеспечивать укладку пакетов, блок-пакетов и контейнеров массой до 24 т в любую точку грузовой палубы и трюма по ширине и длине без дополнительных операций;
- минимальный вылет стрел за борт должен быть не менее 6,5 м.

На рисунке 1.13 представлен лесовоз-пакетовоз "Капитан Бурмакин" дедвейтом 14200 т, отвечающий перечисленным требованиям.



Рисунок 1.13 – Лесовоз-пакетовоз "Капитан Бурмакин"
дедвейтом 14200 т

Дальнейшее укрупнение грузовой единицы привело к созданию специализированных судов – **контейнеровозов**, предназначенных для перевозки стандартных контейнеров, обозначаемых TEU (Twenty Equivalent Unit). Его старая классификация IC ISO и название – двадцатифутовый (6 м, 20 т) контейнер. Кроме контейнеров TEU применяются контейнеры FEU (Forty Equivalent Unit) – 1A ISO и название – сорокафутовый (12 м, 30 т) контейнер. По длине он точно соответствует двум контейнерам TEU. Эти контейнеры имеют международные сертификаты ISO и хорошо приспособлены для морской перевозки.

Первые контейнеровозы размещали контейнеры в основном в грузовых трюмах ячеистого типа и лишь два-три ряда контейнеров по высоте в виде палубного груза. Причем, для снижения ударных нагрузок во время шторма на палубе бака предусматривался волнолом. На рисунке 1.14 представлен контейнеровоз "Художник Сарьян" вместимостью 824 контейнера. Значительное увеличение контейнерных перевозок за последние годы, а главное, создание стабильных, устойчивых грузопотоков, позволили существенно увеличить грузоподъемность контейнеровозов.

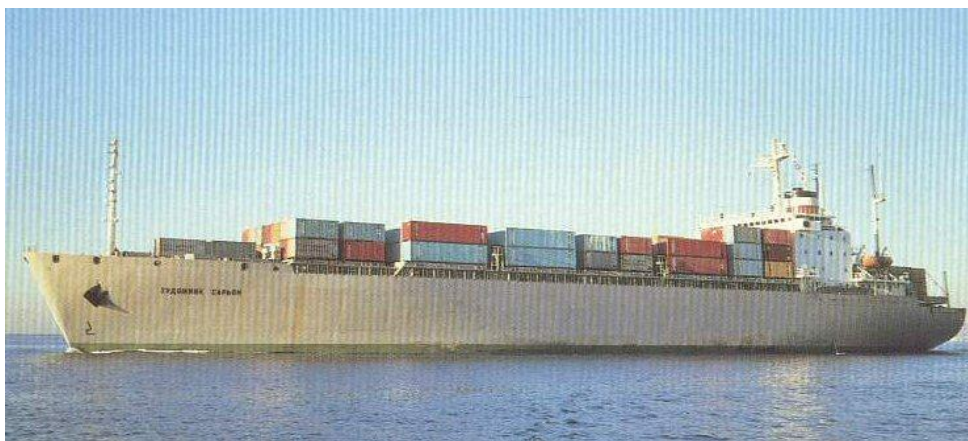


Рисунок 1.14 – Контейнеровоз "Художник Сарьян"
вместимостью 824 контейнера

На рисунке 1.15 изображен контейнеровоз "Syms Peonia" с кормовым расположением машинного отделения и надстройки, на котором палубный груз контейнеров доведен до шести рядов по высоте и даже палуба бака также используется как грузовая. Для выполнения погрузочно-разгрузочных работ контейнеровоз при этом имеет два грузовых крана.



Рисунок 1.15– Контейнеровоз "Syms Peonia"
с кормовым расположением машинного отделения и надстройки

На рисунке 1.16 а показан особо крупный контейнеровоз "СМА CGM Christophe Colomb" с промежуточным расположением машинного отделения и надстройки, также полностью загруженный палубным грузом контейнеров в шесть рядов по высоте.

Основные характеристики СМА CGM Christophe Colomb: длина 365,5 м, ширина 51,2 м, дедвейт 157092 т, вместимость 13880 NEU и подключения на 800 рефконтейнеров, скорость 24,1 уз. Место строительства Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co. Ltd., Окло.

Стремление всемерного увеличения контейнеровместимости практически не оставляет места для серьезных архитектурных проработок. Контейнеровоз в настоящее время воспринимается как огромный морской плавающий ящик, где даже требования безопасности плавания судна учитываются далеко не всегда.

Так, контейнеровоз " СМА CGM Christophe Colomb " имеет ограниченный обзор не только на переднем, но и на заднем ходу. Этот недостаток частично компенсируется наличием систем видеонаблюдения (на носовой мачте и крыльях мостика).



Рисунок 1.16 а – Контейнеровоз "СМА CGM Christophe Colomb" с промежуточным расположением машинного отделения и надстройки



Рисунок 1.16 б – Крупнейший контейнеровоз " СМА Emma Maersk " имеет прекрасное архитектурное оформление



Рисунок 1.16 в –Контейнеровоз "Katarina" с носовым расположением надстройки

Тем не менее, практика проектирования и постройки контейнеровозов отвергает такое заключение. Так, построенный в 2006 году гигантский контейнеровоз « Emma Maersk» на верфи Lindoe в Дании имеет прекрасное архитектурное оформление (см. рис. 1.16 б). Основные данные СМА Emma Maersk: длина 397,6 м, ширина 55,9 м, дедвейт 156907 т, вместимость 13460 TEU и подключения на 1000 рефконтейнеров, скорость 25,5 уз.

Отметим, что уязвимость палубного контейнерного груза при сильных штормах, особенно при косом курсе к волне, требует серьезных конструктивных решений [44]. На рисунке 16 в показан контейнеровоз "Katarina" надстройка которого расположена в носу, а машинное отделение в

корме, что позволяет защитить палубный груз от повреждения при сильном шторме. Основные характеристики рассматриваемого контейнеровоза: длина 176 м, ширина 23,7 м, осадка в грузу 7,7 м, дедвейт 19825 т, скорость хода 21 уз.

Суда с горизонтальным способом грузообработки, получившие более распространенное название **ролкеры** или *Ro-Ro* (от англ. Roll on - Roll off – вкатывай - выкатывай), в основном предназначены для перевозки колесной техники (автомобили, тракторы, сельскохозяйственная техника и контейнеры на специальных трейлерах). Погрузка – разгрузка таких судов осуществляется с помощью специальных автопогрузчиков или тягачей. Ролкеры достаточно близки к универсальным сухогрузам. На рисунке 1.17 представлен ролкер "Инженер Ермошкин" вместимостью 1305 контейнеров и 240 легковых автомобилей. Судно с кормовым расположением машинного отделения и надстройки имеет кормовую угловую рампу для производства грузовых операций.



Рисунок 1.17 – Ролкер "Инженер Ермошкин" вместимостью 1305 контейнеров и 240 легковых автомобилей

Особого внимания заслуживают узкоспециализированные суда – **автомобилевозы**, предназначенные для перевозки легковых автомобилей

(рисунок 1.18). Легковые автомобили относятся к легким грузам, поэтому такие суда имеют до 16 палуб, располагаемых как в корпусе судна, так и в надстройке [44].



Рисунок 1.18 – Узкоспециализированный автомобилевоз

Дальнейшее укрупнение грузовой единицы в виде специализированных барж или лихтеров позволило соединить в единую транспортную систему речной и морской транспорт. Судами, предназначенными для перевозки "от ворот до ворот" унифицированных плавучих контейнеров, являются *баржевозы* или *лихтеровозы*. Архитектурно-конструктивные особенности таких судов зависят от следующих факторов: размера баржи или лихтера; типа грузоподъемного устройства; целевого назначения.

Лихтеровозы типа Си-Би (рисунок 1.19) имеют подъемники (синхролифт), которые поднимают из воды до уровня определенной палубы обычно два лихтера. Дальнейшее перемещение происходит с помощью специального транспортера – трансбордера (ряда специальных тележек с гидравлическими домкратами). Грузоподъемность синхролифта достигает 2000 т. Машинное отделение расположено в средней части судна, а надстройка на этих судах расположена в носовой части.



Рисунок 1.19 – Лихтеровоз "Тибор Самуэли"

Лихтеровозы типа ЛЭШ имеют ячеистую конструкцию трюмов. Грузовые операции осуществляются с помощью тяжелого передвижного козлового крана, перемещающегося от носовой надстройки и до консолей, расположенных над кормовым вырезом.

На рисунке 1.20 показан лихтеровоз-контейнеровоз "Севморпуть" типа ЛЭШ с атомной энергетической установкой ледокольного класса для работы в Арктике.



Рисунок 1.20 – Лихтеровоз-контейнеровоз "Севморпуть"

Развитие техники на современном этапе привело к необходимости транспортировки крупных тяжеловесных грузов. На рисунке 1.21 изображено универсальное сухогрузное судно, перевозящее тяжелые крупногаба-

ритные грузы, с кормовым расположением машинного отделения и надстройки.



Рисунок 1.21 – Универсальное сухогрузное судно для перевозки тяжёловесных крупногабаритных грузов

На рисунке 1.22 приведено судно ро-флоу "Стахановец Котов", предназначенное для перевозки тяжёловесных крупногабаритных единиц, имеющее специальную док-камеру для размещения грузов.



Рисунок 1.22 – Судно ро-флоу "Стахановец Котов" для перевозки крупногабаритных и тяжёловесных грузов

Освоение морской добычи нефти и газа потребовало создания специализированных плавучих самоподъемных и полупогружных морских буровых установок. Для транспортировки таких сверхкрупных грузовых единиц созданы морские суда-доки "Dockwise". На рисунке 1.23 показано судно "Dockwise" без груза с машинным отделением и надстройкой в носу.



Рисунок 1.23 – Специализированное судно-док "Dockwise", для транспортировки тяжелых крупногабаритных грузов на палубе

На рисунке 1.24 изображена транспортировка судном-доком "Dockwise" морской самоподъемной плавучей буровой установки (СПБУ).



Рисунок 1.24 – Судно-док "Dockwise", транспортирующее СПБУ

На рисунке 1.25 представлена транспортировка судном-доком "Dockwise" полупогружной плавучей буровой установки (ППБУ).



Рисунок 1.25 – Судно-док "Dockwise", транспортирующее ППБУ

Для транспортировки полупогружных платформ судно притапливается приемом балласта, буксирами установка заводится над палубой. Затем балласт откачивается и судно с грузом всплывает в транспортное положение.

На рисунке 1.26 изображена транспортировка плавучей гостиницы.



Рисунок 1.26 – Судно-док "Dockwise", транспортирующее плавучую гостиницу

Балкеры или **балкериеры** (от англ. bulk – навалом, bulk carrier – судно для перевозки грузов навалом) – суда для перевозки массовых насыпных и навалочных грузов (рудовозы, углевозы, бокситовозы, цементовозы, зерновозы и др.). Балкеры имеют большую грузоподъемность, поскольку для таких грузов существует стабильный и неограниченный грузопоток. На рисунке 1.27 изображен японский балкер линейного плавания, не имеющий собственных грузовых средств.



Рисунок 1.27 – Японский балкер линейного плавания

Грузовые операции на таких судах обеспечивают специализированные порты своими силами. Судно имеет машинное отделение и надстройку, которые расположены в корме. На рисунке 1.28 изображен балкер, имеющий носовую и кормовую надстройки и оборудованный собственным грузовым устройством.



Рисунок 1.28 – Балкер "Alcowsay"

На рисунке 1.29 представлен балкер "Зоя Космодемьянская" дедвейтом 50000 т, имеющий бак и кормовую надстройки, перевозящий трубы для морских буровых установок.



Рисунок 1.29 – Балкер "Зоя Космодемьянская" дедвейтом 50000 т

Наливные суда или **танкеры** предназначены для перевозки жидких грузов наливом в корпус судна. Танкеры, перевозящие нефтепродукты, имеют сравнительно небольшой дедвейт 10-40 тысяч тонн. На рисунке 1.30 показан танкер "Туапсе" дедвейтом 23900 т, имеющий бак и кормовую надстройку.



Рисунок 1.30 – Танкер "Туапсе" дедвейтом 23900 т

Самыми крупными судами в мире являются танкеры для перевозки сырой нефти, поскольку партионность этого вида груза практически неограниченна. На рисунке 1.31 представлен супертанкер "Jahre Viking",

имеющий грузоподъемность 568000 т, длину 458,4 м, ширину 68,9 м, высоту борта 29,8 м и осадку 24,6 м.



Рисунок 1.31 – Супертанкер "Jahre Viking"

Отметим, некоторые современные крупнотоннажные танкеры по архитектурно-конструктивному типу являются гладкопалубными судами, имеющими только рубки, без надстроек (рисунок 1.32).



Рисунок 1.32 – Танкер "Jahre Traveller", не имеющий надстроек

Наиболее сложный архитектурно-конструктивный тип имеют **танкеры-химовозы**, предназначенные для перевозки особо агрессивных жид-

ких грузов. Танкер-химовоз "Minerva" (рисунок 1.33) имеет баковую и кормовую надстройки со сложным оборудованием и грузовым краном на верхней открытой палубе.



Рисунок 1.33 – Танкер-химовоз "Minerva"

Не менее сложное архитектурно-конструктивное решение имеют *суда-газовозы*, предназначенные для перевозки охлажденных сжиженных газов. По конструктивному оформлению грузовых помещений суда-газовозы подразделяются на газовозы с танками мембранного типа и газовозы с вкладными цистернами. Газовоз с танками мембранного типа имеет практически сплошную надстройку и кормовое расположение машинного отделения (рисунок 1.34).



Рисунок 1.34 – Газовоз с танками мембранного типа

На рисунке 1.35 изображен газовоз со сферическими вкладными цистернами, кормовым расположением машинного отделения и надстройки.



Рисунок 1.35 – Газовоз со сферическими вкладными цистернами

Приведенные выше силуэты и боковые виды различных типов пассажирских, грузовых и грузо-пассажирских судов показывают громадный разброс в методологии архитектурных решений, которые предопределили бы эстетические критерии создания современного судна. Однако, сопоставление ряда решений, их анализ и оценка, а также попытка сформулировать некоторые общие выводы могут оказать определенную помощь при проектировании новых судов, хотя общий рецепт красоты дать трудно [6].

В зависимости от архитектурного замысла лобовая стенка надстройки принимается либо вертикальной, либо наклонной. Ее наклон подчеркивает горизонтальную динамику композиции (рисунок 1.36). Вместе с тем, такой наклон затрудняет использование внутренних помещений, ограниченных лобовой стенкой надстройки [61]. Во избежание этого, на некоторых пассажирских судах (например, на лайнере "Роттердам", рисунок 1.37) вместо наклона лобовой стенки надстройки применена ступенчатая конструкция в виде террас.



Рисунок 1.36 – Автомобильно-пассажирский паром "Adriana Sklenarikova"

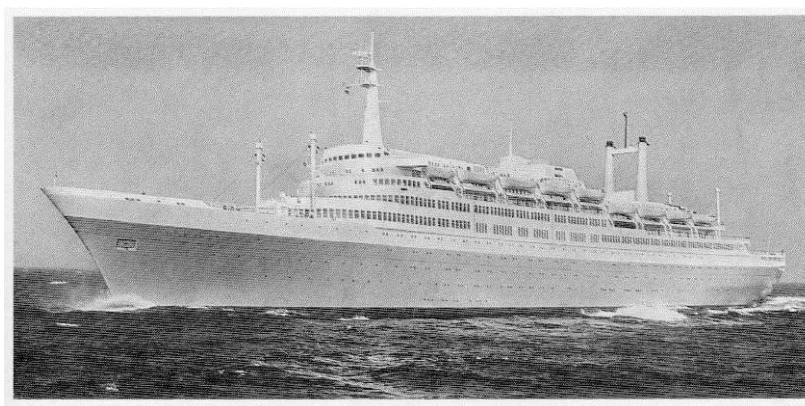


Рисунок 1.37 – Трансатлантический лайнер "Rotterdam"

При выборе архитектурного решения необходимо помнить, что высота и наклон лобовой стенки надстройки оказывают сильное влияние на образование турбулентной зоны воздуха. Отметим, что турбулентная зона воздуха при прямоугольных надстройках почти в два раза выше, чем при обтекаемых.

Оригинальный тип дымовых труб был создан на суперлайнере "France", переименованный позже в "Norway" (рисунок 1.38). Трубы, оборудованные по бокам широко простирающимися большими крыльями, выбрасывают продукты сгорания со стороны подветренного борта, что предупреждает попадание сажи на пассажиров и палубы. Специальные автоматические устройства позволяют направлять дым в правое или левое крыло в зависимости от ветра и сообщать ему необходимую скорость.



Рисунок 1.38 – Дымовые трубы на суперлайнере "France" ("Norway")

На крупных научно-исследовательских судах для размещения антенн и аппаратуры, часто устанавливают массивные башенные мачты в виде пирамидальных или конических колонн (рисунок 1.39).

а)



б)



Рисунок 1.39 – Научно-исследовательское судно:

а) "Космонавт Юрий Гагарин"; б) "Космонавт Владимир Комаров"

1.5. Контрольные вопросы

1. Перечислите основные задачи курса «Основы проектирования судов и плавучих сооружений».
2. Назовите основные качества судна, классификацию искомых и заданных величин.
3. Сущность метода последовательных приближений как основного метода проектирования судов.
4. Выбор архитектурно-конструктивного типа морского судна.
5. Перечислите требования к архитектурно-конструктивным типам морских судов.
6. Архитектурно-конструктивные типы пассажирских и грузопассажирских морских судов.
7. Архитектурно-конструктивные типы морских грузовых судов.
8. Назовите принципы формирования элементов внешнего вида морского судна.

1.6. Основные термины и понятия

Проектирование судна	Архитектурно-конструктивный тип
Основные качества судна	Эскизный проект
Техническое задание	Технический проект
Главные размерения	Бортовой контур
Силуэт судна	

РАЗДЕЛ II. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОЕКТИРУЕМОГО СУДНА В ПЕРВОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

2.1. Общие соображения и постановка задачи

В число главных обобщенных искомых величин, характеризующих основные качества проектируемого судна (как сложного инженерного сооружения, имеющего необходимую плавучесть, заданную вместимость) и обеспечивающих заданную ходкость, как отмечалось ранее, входят: водоизмещение, кубатура судна и мощность главных двигателей.

В задаче проектирования судов эти величины, как правило, являются неизвестными, причем каждая из них также является сложной функцией целого ряда как известных, так и неизвестных величин. Поэтому, первоочередной и главной задачей проектирования является определение водоизмещения, кубатуры судна и мощности главных двигателей, являющихся обобщенными неизвестными величинами проектируемого судна.

Для решения поставленной задачи необходимо раскрыть вид каждой из функций F_1 , F_2 и F_3 , входящих в систему уравнений, определяющих главные обобщенные неизвестные Δ , W и N_e . Для этого будем исходить из следующих соображений:

1. Вес всякого судна, равный его водоизмещению Δ , можно разложить по тем или другим признакам на ряд отдельных весов $P_1, P_2, P_3 \dots P_i \dots P_n$.

Выражая каждый из этих весов, входящих в состав водоизмещения судна, в функции от обобщенных неизвестных Δ , W и N_e и известных в задаче величин $a, b, c \dots$ мы можем представить первое уравнение в виде:

$$\Delta = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_i + \dots + P_n = \sum_{i=1}^{i=n} P_i. \quad (2.1)$$

Это уравнение в зависимости от решаемых задач называется уравнением масс или весов, составляющих водоизмещение судна¹.

2. Мощность главных двигателей судна N_e , необходимая для получения заданной скорости хода v_s может быть выражена, в функции водоизмещения и скорости судна в первом приближении зависимостью следующего вида:

$$N_e = \frac{\nabla^m \cdot v_s^n}{C_{mn}}, \text{ или } N_e = \frac{\Delta^m \cdot v_s^n}{C_{mn}}, \quad (2.2)$$

где C_{mn} – коэффициент, определяемый по данным близких судов-прототипов.

Назовем эту зависимость уравнением мощности.

3. Кубатура судна W в рассматриваемой задаче также может быть разложена по тем или другим признакам на отдельные объемы

¹ Введение международной системы единиц измерения (Система СИ) породило некоторые недоразумения, основанные на том, что система СИ в качестве основных единиц в механике устанавливает единицу *массы* (килограмм, кг), *длины* (метр, м) и *времени* (секунда, с) вместо прежних, привычных для инженера единиц *силы* (килограмм-сила, кгс), *длины* (метр, м) и *времени* (секунда, с). У инженеров создалось впечатление, что само понятие веса и весового водоизмещения должно быть упразднено в кораблестроении. Определяющую роль в этом сыграло появление в некоторых документах и литературе не очень удачных терминов: "нагрузка масс" вместо "весовая нагрузка", "центр масс" вместо "центр тяжести" и даже "уравнение масс" вместо "уравнение весов". На самом деле введение системы СИ (как и любой другой системы единиц) не отменяет понятий силы и его частной разновидности – понятия веса, а тем более законов механики, в том числе и закона Архимеда. То новое, что действительно вносит система СИ, состоит в следующем: отменяется такая единица как килограмм-сила и все дольные и кратные ей единицы (грамм-сила, тонна-сила и т.п.). Если инженер оперирует весами, то он обязан теперь употреблять для силы новую единицу – Ньютон (Н) или дольные и кратные единицы (дециньютон, дН; деканьютон, даН; килоньютон, кН и т.д.). Один ньютон – сила, которая сообщает массе в 1 кг ускорение, равное 1 м/с^2 , тогда как прежняя единица силы (кгс) сообщала той же массе в 1 кг ускорение $9,81 \text{ м/с}^2$. Следовательно, $1 \text{ кгс} = 9,81 \text{ Н}$ и $1 \text{ Н} = 0,102 \text{ кгс}$. Прежняя единица $1 \text{ тс} = 1000 \text{ кгс}$ в новой системе СИ не употребляется, а для использования ранее созданных технической документации, справочников и технической литературы в новых условиях следует иметь в виду, что $1 \text{ кН} = 102 \text{ кгс}$ и $1 \text{ тс} = 9810 \text{ Н}$. В прежней системе единиц масса в одну тонну весила в земных условиях ровно одну тонну-силу. Таким образом, водоизмещение судна, измеренное в тоннах-силах, численно равно его массе в тоннах. При этом необходимо помнить, что скалярная величина «масса» не может заменить векторную величину «сила» [58]. В данной работе в дальнейшем мы будем использовать уравнение (2.1) в основном как уравнение весов.

$W_1, W_2, W_3 \dots W_i \dots W_n$. Если каждый объем, за исключением заданных объемов, выразить в функции от величины Δ , W и N_e , а так же известных величин $a, b, c \dots$, то второе из уравнений системы может быть представлено в виде:

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + \dots + W_i + \dots + W_n = \sum_{i=1}^{i=n} W_i. \quad (2.3)$$

Назовем это уравнение уравнением объемов, составляющих кубатуру судна. Рассмотренные уравнения позволяют определить водоизмещение, кубатуру и мощность проектируемого судна в первом приближении. При этом следует учитывать, что в данных уравнениях отсутствует связь с главными размерениями и коэффициентами полноты корпуса судна, а также с основными качествами, выпавшими из поля зрения при составлении уравнений (остойчивость, непотопляемость, прочность и т. п.). Поэтому в первом приближении учет этих качеств производится путем выбора различных нормативов и эмпирических коэффициентов, входящих в эти уравнения. Подчеркнем, степень приближения предварительного определения главных элементов к окончательному решению задачи будет в значительной степени зависеть от правильности выбора указанных нормативов и эмпирических коэффициентов. Поэтому к выбору указанных величин необходимо относиться очень внимательно [51].

Для практического же использования рассмотренные уравнения (2.1 – 2.3), необходимо преобразовать и привести к такому виду, чтобы они содержали в себе явным образом соответствующие известные величины, а также величины, предполагаемые известными (нормативы, параметры, эмпирические коэффициенты).

2.2. Уравнение мощности и его разновидности

2.2.1. Определение мощности энергетической установки по двух-компонентным формулам в функции Δ и v_s

Сопротивление воды движению судна определим в виде [13]

$$R_x = \zeta \cdot \frac{\rho}{2} \cdot S_f \cdot v_s^2 \quad (2.4)$$

где ζ – безразмерный коэффициент полного сопротивления судна, зависящий от формы обводов судна, числа Фруда и числа Рейнольдса; ρ – плотность морской воды, кг/м³; S_f – площадь смоченной поверхности, м²; v_s – скорость судна, узл.

При составлении приближенных формул определения сопротивления судна: 1) влияние числа Рейнольдса обычно стремятся исключить, применяя формулу к одному волновому или остаточному сопротивлению; 2) влияние числа Рейнольдса учитывают, но изменяя при этом вид формулы, с тем чтобы сопротивление судна можно было приближенно считать независимым от масштаба; 3) пренебрегают этим влиянием, учитывая приближенный характер способов расчета.

Поступая, таким образом, проектанты считают, что коэффициент ζ сохраняет в этом случае постоянное значение для всех геометрически подобных судов при равных числах Фруда. Коэффициент ζ остается после этого функцией формы судна и числа Фруда. В разных способах расчетов

коэффициенту $\zeta = \frac{R_x}{\frac{\rho}{2} \cdot S_f \cdot v_s^2}$ придается различная форма.

Смысл величины S_f , в соответствии с законом подобия, является произвольным, с тем лишь ограничением, что S_f имеет размерность квадрата линейной величины (например, площадь) и измеряется одинаковым образом у судов разного размера.

Например, можно приписать ей следующие значения:

L^2 – квадрата длины судна;

S_f – площади смоченной поверхности;

S_{mid} – площади мидель-шпангоута;

$\nabla^{2/3}$ – объемного водоизмещения в степени $2/3$.

Все эти значения находят применение в различных формулах теории корабля. Второе значение S_f применяется главным образом в формулах для сопротивления трения, остальные применяются для более широких целей, причем формулы получают вид:

$$\begin{aligned} R_{x1} &= \zeta_1 \cdot \frac{\rho}{2} L^2 \cdot v_s^2, \\ R_{x2} &= \zeta_2 \cdot \frac{\rho}{2} \cdot S_{mid} \cdot v_s^2, \\ R_{x3} &= \zeta_3 \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \nabla^{2/3} \cdot v_s^2. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Из выражений (2.5) следует, что между коэффициентами ζ_1 , ζ_2 , ζ_3 существует простая связь, определяемая геометрическими соотношениями судна.

В нашей задаче определения мощности проектируемого судна в первом приближении наиболее удачной является последняя зависимость $R_x = f(\nabla)$, устанавливающая связь сопротивления судна с его водоизмещением:

$$R_x = \zeta \frac{\rho}{2} \nabla^{2/3} v_s^2. \quad (2.6)$$

Буксировочная мощность в кВт, то есть мощность, которую необходимо затратить, чтобы буксировать судно с заданной скоростью, определится по формуле [13]:

$$EPS = \frac{R_x v_s}{102}. \quad (2.7)$$

Подставляя значение (2.6) сопротивления судна в формулу (2.7), получим

$$EPS = \zeta \frac{\rho}{150} \left(\frac{v_s}{0,514} \right)^3 \nabla^{2/3}, \quad (2.8)$$

где 0,514 – переходный множитель от скорости v_s в уз. к скорости v в м/с.

Положим $C_e = \frac{150 \cdot 0,514^3}{\rho \zeta}$, тогда формулу (2.8) можно представить в виде

$$EPS = \frac{\nabla^{2/3} v_s^3}{C_e}. \quad (2.9)$$

Коэффициент C_e обычно называют адмиралтейским коэффициентом буксировочной мощности.

Рассмотрим источники погрешности при пересчете буксировочной мощности с судна-прототипа на проектируемое судно. Предположим, что обводы проектируемого судна геометрически подобны обводам судна – прототипа. Полный коэффициент сопротивления равен сумме коэффициентов остаточного сопротивления и сопротивления трения $\zeta = \zeta_{ост} + \zeta_f$.

При условии сохранения $Fr_1 = Fr_2 = const$ коэффициент $\zeta_{ост}$ будет одинаковым для обоих судов.

Коэффициент трения ζ_f является функцией числа Рейнольдса и может считаться одинаковым только при выполнении условия

$$Re = \frac{v_s L}{\nu} = const.$$

Выразим скорость v_s через число Фруда $v_s = Fr \sqrt{gL}$ и подставим в формулу для числа Рейнольдса

$$Re = \frac{Fr \sqrt{gL^3}}{\nu}.$$

При пересчете буксировочной мощности с судна – прототипа на проектируемое судно при одинаковых относительных скоростях, будем иметь $Fr = const$; $g = const$; $v_s = const$. Следовательно, число Рейнольдса будет

меняться по зависимости $Re = k L^{3/2}$. Но из теории корабля известно, что график $\zeta_f = f(Re)$ имеет вид (рисунок 2.1).

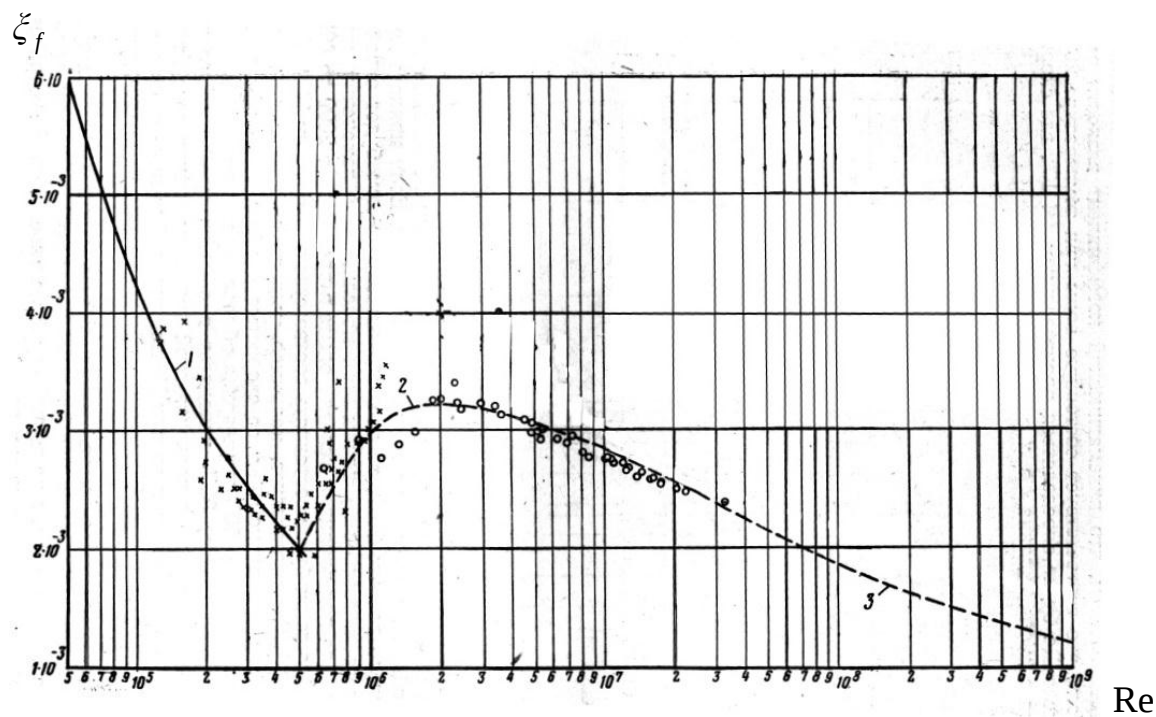


Рисунок 2.1 – Изменение коэффициента трения ζ_f в функции

числа Рейнольдса: $1 - \zeta_f = \frac{1,327}{\sqrt{Re}}$; $2 - \zeta_f = \frac{0,074}{\sqrt[5]{Re}} - \frac{1700}{Re}$;

$$3 - \zeta_f = \frac{0,074}{\sqrt[5]{Re}}$$

Следовательно, при геометрически подобных обводах прототипа и проектируемого судна, коэффициент трения ζ_f будет меняться с изменением длины судна. Причем с увеличением длины проектируемого судна ζ_f будет медленно убывать. При этом коэффициент полного сопротивления ζ будет также уменьшаться, а коэффициент C_e соответственно несколько возрастет. Очевидно, при допущении условия $C_e = const$ определяемая по формуле (2.7) буксировочная мощность будет в этом случае несколько завышена [48].

Следовательно, задача определения буксировочной мощности по формуле (2.7) не представляет затруднений в том случае, если форму подводной части проектируемого судна предполагается воспроизвести геометрически подобной форме судна-прототипа, для этого в распоряжении проектанта должны быть соответствующие диаграммы буксировочных мощностей в функции от скорости, полученные при испытании модели судна в бассейне, или на основе натурных испытаний судна в море.

Однако этот случай в практике проектирования судов является редким в силу следующих обстоятельств. Прежде всего, в процессе проектирования судов мало вероятна возможность точного соблюдения геометрического подобия формы проектируемого судна и судна-прототипа, так как форма судов определяется не только из условий ходкости, но и из целого ряда других условий (остойчивости, вместимости, прочности, маневренных качеств и т. д.), соблюдение которых для проектируемого судна может находиться в противоречии с геометрическим подобием формы. Кроме того, большую трудность представляет и сам выбор прототипа для формы обводов проектируемого судна даже в том случае, если ограничиться для выбора этой формы только критерием ходкости судна. Если произвести сравнение численного значения коэффициента C_e для некоторого количества близких однотипных судов, имеющих приблизительно одинаковые величины водоизмещений и максимальных скоростей хода, то мы обнаружим значительные колебания в величинах указанного коэффициента C_e , достигающие до $\pm 15\%$, а иногда и более от среднего значения этого коэффициента.

Поэтому в практике проектирования судов для оценки величины коэффициента C_e в рассматриваемой нами стадии проектирования, когда решается вопрос об определении в первом приближении интересующих нас главных элементов проектируемого судна, прототип подбирается обычно из числа построенных судов по признакам однородности архитектурного типа и назначения судна, скорости его хода, а также типа и быстроходности главных двига-

телей. При этих условиях говорить о полном геометрическом подобии формы подводной части сравниваемых судов, очевидно, не приходится, а можно говорить только о некоторой *сходственности этой формы*, которая определяется близостью различных соотношений главных размерений и безразмерных коэффициентов, характеризующих форму судна.

Таким образом, степень точности определения коэффициента C_e главным образом будет определяться качеством подбора близкого судна-прототипа.

Решение задачи осложняется также и тем, что для наших целей под величиной мощности приходится подразумевать не буксировочную мощность, а полную мощность главных механизмов, которая определяется в виде

$$N_e = \frac{EPS}{\eta_o \eta_e}, \quad (2.10)$$

где η_o – пропульсивный коэффициент, η_e – коэффициент полезного действия валопровода и редукторов.

Величина пропульсивного коэффициента η_o учитывает все потери мощности, происходящие при работе движителей, а η_e потери на трение во всех передачах от главных двигателей к движителям (в дейдвудных трубах, в опорных и упорных подшипниках валопровода, редукторах и т.д.).

Применяя законы механического подобия к мощности главных механизмов судна при использовании формулы (2.10), мы тем самым предполагаем величину пропульсивного коэффициента η_o постоянной, а следовательно, постоянной и величину коэффициента полезного действия движителя.

Практически коэффициент полезного действия движителей для подобных судов, при соответственных скоростях хода, а следовательно, и пропульсивный коэффициент η_o не остаются постоянными. Однако ошибка, которую мы делаем в предположении постоянства величины пропульсивного коэффициента η_o , является незначительной, в особенности, если

сравниваются между собой однотипные суда, близкие по размерам и скоростям хода, а также имеющие конструктивные аналогичные схемы пропульсивного оборудования. Поэтому для однотипных судов пропульсивный коэффициент η_o обычно принимается по близкому судну прототипу.

В практике проектирования судов формула (2.10) для определения мощности главных механизмов судна нашла более широкое распространение в следующем виде, удобном для совместного решения с уравнением весов

$$N_e = \frac{\Delta^{2/3} v_s^3}{C_A}, \quad (2.11)$$

где C_A – обычно называют адмиралтейским коэффициентом.

Коэффициенты C_A и C_e имеют простую связь

$$C_A = \eta_o \eta_e C_e. \quad (2.12)$$

Значение коэффициента C_A при максимальной скорости хода для различных типов судов изменяется в весьма широких пределах, а именно от 40 до 800. Поэтому при практических расчетах определение коэффициента C_A необходимо производить по наиболее близкому судну-прототипу с учетом вышеизложенных замечаний.

Зависимость адмиралтейского коэффициента C_A от числа Fr показана на рисунке 2.2.

Из рисунка 2.2 следует, что при малых числах Fr , когда волновое сопротивление практически отсутствует, коэффициент остаточного сопротивления состоит из одного практически неизменяющегося коэффициента формы; коэффициент трения слабо уменьшается по мере роста числа Фруда, а значит, и числа Рейнольдса. Этому способствует слабый рост адмиралтейского коэффициента с ростом числа Фруда.

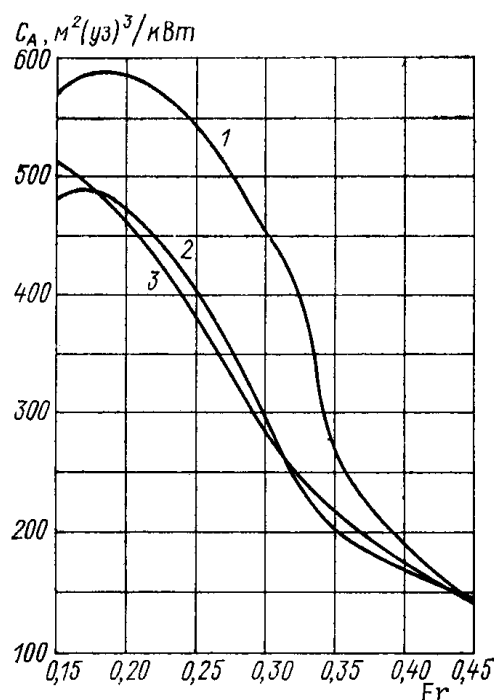


Рисунок 2.2 – Зависимость адмиралтейского коэффициента от числа Фруда
 1 – малый траулер ($l = 5,06$; $\varphi = 0,57$); 2 – малый траулер ($l = 4,48$;
 $\varphi = 0,625$); 3 – большой морозильный траулер ($l = 4,93$; $\varphi = 0,68$),
 где φ – коэффициент продольной полноты

Однако, по мере дальнейшего роста числа Фруда появляется и быстро нарастает коэффициент волнового сопротивления, кривая которого, как известно, характеризуется наличием максимумов и минимумов вследствие интерференции носовой и кормовой систем поперечных волн. Этому участку на оси абсцисс отвечает быстрое и неравномерное падение адмиралтейского коэффициента. С момента, когда на длине судна уместается не более полуволны, т.е. начиная с чисел Фруда 0,55 и выше, дальнейший рост скорости не приводит к увеличению коэффициента волнового сопротивления; обычно он стабилизируется. Адмиралтейский коэффициент здесь также стабилизируется [58].

Из анализа формулы адмиралтейского коэффициента вытекают следующие выводы:

1. Для тихоходных судов, волновое сопротивление которых мало по сравнению с сопротивлением трения, адмиралтейский коэффициент сохраняет практически постоянное значение, не зависящее от чисел Фруда при $Fr < 0,25$.

2. Адмиралтейский коэффициент для судов средней быстроходности и для быстроходных судов при $Fr \geq 0,25$ может существенно меняться от числа Фруда.

Учитывая, что формула (2.11) дает несколько завышенные результаты, английский инженер Эйр (Ayre) предложил формулу с меньшим влиянием водоизмещения судна на мощность, понизив показатель $m = 0,67$ до величины $m = 0,64$, в виде

$$N_e = \frac{\Delta^{0,64} \cdot v_s^3}{C_{mn}}, \quad (2.13)$$

где C_{mn} – коэффициент, определяемый по данным близких судов-прототипов.

Известная формула В.И. Афанасьева $N_e = 1000 \left(\frac{B \cdot \nabla^2}{L^2} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{v_s}{A} \right)^{10/3}$

также может быть приведена к виду

$$N_e = \frac{\Delta^{0,56} \cdot v_s^{3,33}}{C_{mn}}, \quad (2.14')$$

где еще больше уменьшено влияние водоизмещения судна на мощность, но увеличено влияние скорости хода до показателя $n = 3,33$ [1].

Несколько иначе формулы вида (2.14) были выведены А.И. Раковым для сейнеров и траулеров [54]. Анализируя кривые буксировочных мощностей этих судов, полученные по испытаниям модели в опытовых бассейнах, он пришел к выводу, что при скоростях, близких к скорости полного хода, эти кривые изменяются пропорционально скорости в степени близ-

кой к $n = 5$. Тогда формулу (2.14) для сейнеров можно привести по условиям подобия к виду:

$$N_e = \frac{\Delta^{1/3} \cdot v_s^5}{C_{mn}}, \quad (2.15)$$

где $C_{mn} = 3330 \pm 210$.

Рекомендуемые пределы ее применимости ограничены диапазонами: водоизмещения, т $50 \leq \Delta \leq 240$ и скорости, узлы $7 \leq v_s \leq 11$.

Для траулеров влияние скорости на мощность несколько уменьшено до $n = 4,5$ и формула (2.14) имеет вид:

$$N_e = \frac{\Delta^{1/3} \cdot v_s^{4.5}}{C_{mn}}, \quad (2.16)$$

где $C_{mn} = 1270 \pm 137$.

Пределы применимости (2.16) ограничены диапазонами: водоизмещения, т $350 \leq \Delta \leq 3600$ и скорости, узл $8 \leq v_s \leq 16$.

Рассмотрим варианты составления уравнения мощности (2.14) в тех случаях в которых показатели степени m и n не отвечают требованиям динамического подобия, но коэффициент C_{mn} при этом имеет малые колебания, т.е. оказывается практически постоянной величиной.

Возможность и целесообразность использования таких уравнений была показана В.В. Давыдовым для транспортных судов [1]. Им была поставлена и решена следующая задача: имея статистический набор достоверных сведений о водоизмещении, эффективной мощности и скорости полного хода ряда однотипных судов одного назначения, определить постоянные показатели степени m и n , а также коэффициент C_{mn} , чтобы среднеквадратичная погрешность расчета мощности для всех рассматриваемых судов по формуле (2.14) была минимальной. Решение задачи было получено методом наименьших квадратов. Для расчета эффективной (не буксировочной) мощности транспортных судов постройки 30-х годов в количестве

20 единиц, водоизмещением от 2100 до 5800 т и скоростью от 9,8 до 23,5 узл оказалось возможным получить формулу вида

$$N_e = \frac{\nabla^{0,5} \cdot v_s^{3,25}}{C_{mn}}, \quad (2.17)$$

где $C_{mn} = 150 \pm 10$.

Аналогичная формула была предложена Энсли:

$$N_e = \frac{\nabla^{0,5} \cdot v_s^3}{C_{mn}}, \quad (2.18)$$

где влияние скорости судна на мощность снижено до показателя $n = 3$, а $C_{mn} = 58,2 \pm 13,4$. Как показало исследование большой группы транспортных судов (порядка 1000 единиц), построенных во второй половине XX века (после 1950 г), выполненное под руководством В.В. Ашика [1], наиболее точные результаты дала формула (2.14) в виде:

$$N_e = \frac{\nabla^{0,5} \cdot v_s^{2,5}}{C_{mn}}, \quad (2.19)$$

где $C_{mn} = 27,2 \pm 2,7$ – дается с учетом среднеквадратичных отклонений.

Для промысловых судов Нгуен-Куанг-Винь получил $C_{mn} = 25,3 \pm 2,9$. Для судов смешанного плавания Данг-Хыу-Фу получил $C_{mn} = 22,0 \pm 1,8$.

В таблице 2.1 приведены значения коэффициентов C_{mn} для различных типоразмеров морских судов. Из данных таблицы 2.1 следует, что коэффициент C_{mn} для различных типоразмеров морских судов изменяется в широком диапазоне. Отметим, наиболее широкое распространение в практике проектирования судов нашли формулы (2.11) и (2.19).

Таким образом, рассмотренные уравнения мощности $N_e = \frac{\nabla^m \cdot v_s^n}{C_{mn}}$

(2.2) рекомендуется использовать в начальных стадиях проектирования, когда еще нельзя определить число Фруда проектируемого судна.

Таблица 2.1 – Значения коэффициентов C_{mn} для различных типоразмеров морских судов

№ п/п	Наименование судов, тип	Δ , т	N_e , кВт	v_s , узл.	(2.11) $C_A = \frac{\Delta^{0,67} \cdot v_s^3}{N_e}$	Эйр (2.13) $C_1 = \frac{\Delta^{0,64} \cdot v_s^3}{N_e}$	Афанасьев (2.14) $C_2 = \frac{\Delta^{0,56} \cdot v_s^{3,33}}{N_e}$	Давыдов (2.17) $C_3 = \frac{\Delta^{0,5} \cdot v_s^{3,25}}{N_e}$	Энстли (2.18) $C_4 = \frac{\Delta^{0,5} \cdot v_s^3}{N_e}$	Ашик (2.19) $C_5 = \frac{\Delta^{0,5} \cdot v_s^{2,5}}{N_e}$	Раков (2.15) $C_6 = \frac{\Delta^{0,33} \cdot v_s^5}{N_e}$	Раков (2.16) $C_7 = \frac{\Delta^{0,33} \cdot v_s^{4,5}}{N_e}$
1	"Глобик Токио", супер-танкер, Япония	550000	31100	15,0	761	512	435	158	80,5	20,8	-	-
2	"Крым", супер-танкер.	182000	22000	16,0	623	433	410	159	79,4	19,9	-	-
3	"Пекин", танкер, СССР	40150	13970	18,5	551	401	449	188	90,8	21,1	-	-
4	"Куин Мери 2", Англия, пассажирское	151400	115550	28,5	592	414	482	180	77,9	14,6	-	-
5	"Атлантик", пассажирское	19536	22080	23,6	446	332	428	183	83,2	17,1	-	-
6	"Одесса", пассажирское	8330	11776	19,0	246	188	242	111	53,2	12,2	-	-
7	"Mariner", сухогруз, США	22560	14170	22,5	663	491	615	263	120,7	25,5	-	-
8	"Капитан Кушнаренко", сухогруз, СССР	22040	10010	19,2	575	426	506	209	100,1	22,8	-	-
9	"Академик Туполев", РО- РО, СССР	8400	6690	17,1	318	243	301	139	68,5	16,6	-	-
10	"Атлантик", траулер- рыбозавод, ГДР	9488	5300	15,0	294	224	263	122	62,0	16,0	-	-
11	"Маяковский", БМРТ, СССР	3660	1470	13,0	365	285	345	172	90,4	25,1	1051	-
12	"РС-300", проект 388, ры- боловный сейнер.	236	220	10,3	194	164	228	146	76,3	23,8	997	3198
13	"МРС-80", проект 389, малый рыболовный сей- нер, СССР	48	59	8,7	150	133	199	132	77,3	26,1	1028	3033
14	"Памир", океанский бук- сир, СССР	2032	3091	17,5	296	227	318	160	78,2	18,7	1568	6558
15	"Тамаран", океанский бук- сир	718	1546	14,0	145	119	169	92	47,6	12,7	814	3047
16	"Сацуки Маару", портовый буксир, Япония	110	368	10,4	71	62	92	58	32,1	9,9	484	1560
17	"Прибой", рейдовый бук- сир, СССР	43	220	9,0	41	37	56	38	21,7	7,3	310	929

2.2.2. Энерговооруженность морских судов

Мощность главных двигателей проектируемого судна выбирается такой, чтобы выполнить требования технического задания по скорости, т.е. мощность должна быть достаточной для преодоления сопротивления воды и воздуха движению судна с заданной скоростью. Сопротивление же зависит от размеров и формы проектируемого судна. Исключение из этого правила приходится делать для буксиров, судов ледового плавания и рыболовных траулеров. Например, мощность буксира при заданной скорости буксировки воза лишь в малой степени зависит от размеров и формы самого буксира. При морских буксировках до 80 – 90 % мощности затрачивается на преодоление сопротивления воза. Поэтому потребная буксировочная мощность практически задается через необходимую тягу на гаке и скорость буксировки. Задания при проектировании судов ледового плавания могут быть весьма разнообразными: от требования обеспечить скорость судна в мелкобитом льду до обеспечения вползания носовой оконечности судна на сплошной лед заданной толщины. При проектировании рыболовных траулеров необходимо учитывать их работу в двух режимах – на свободном ходу и на тралении (при буксировке трала). В этих случаях приходится анализировать, какой из режимов требует большей мощности, т.е. является расчетным.

Большое влияние на мощность главных двигателей проектируемого судна оказывают различные составляющие полного сопротивления корпуса судна. На рисунке 2.3 показано примерное соотношение остаточного сопротивления и сопротивления трения судов в зависимости от числа Фруда в полном сопротивлении [58].

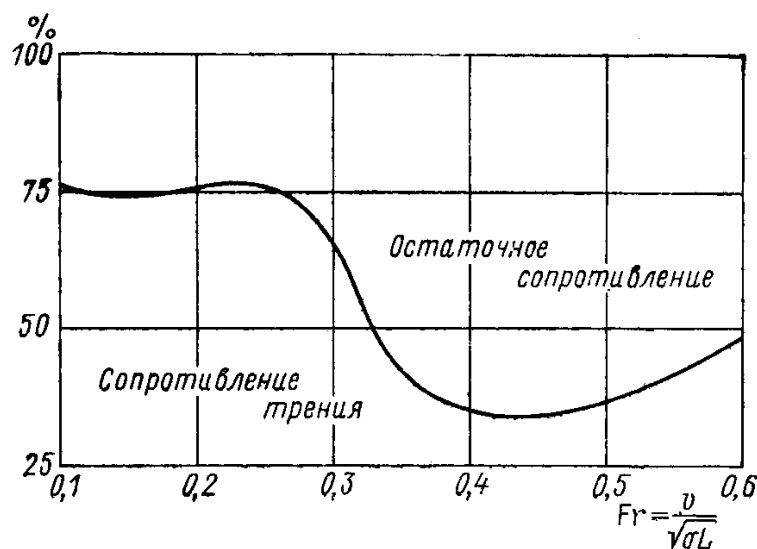


Рисунок 2.3 – Примерное соотношение остаточного сопротивления и сопротивления трения судов в зависимости от числа Фруда

Подобные данные позволяют по относительным скоростям подразделить морские суда на тихоходные (числа Фруда до 0,25), быстроходные (числа Фруда более 0,35) и средней быстроходности (промежуточные числа Фруда). Отметим, многие малые и часть среднетоннажных морских судов, как и крупные быстроходные суда, по относительным скоростям также принадлежат к группе быстроходных судов и характеризуются значительной долей волнового сопротивления (с его сильной чувствительностью к изменениям формы обводов корпуса и скоростного режима). Вместе с тем, и долю сопротивления трения нельзя считать для них малой. Абсолютная величина мощности главных двигателей проектируемого судна не всегда удобна для сравнения энергетических затрат на движение судов различных типов и различных размеров. Поэтому более удобную зависимость можно предложить в виде

$$n_3 = \frac{N_e}{\Delta}, \quad (2.20)$$

где n_3 – принято называть *коэффициентом энерговооруженности судна*, кВт/кН.

На рисунке 2.4 представлен график, осредняющий конкретные данные коэффициента энерговооруженности для ряда промысловых судов в зависимости от водоизмещения судна [58].

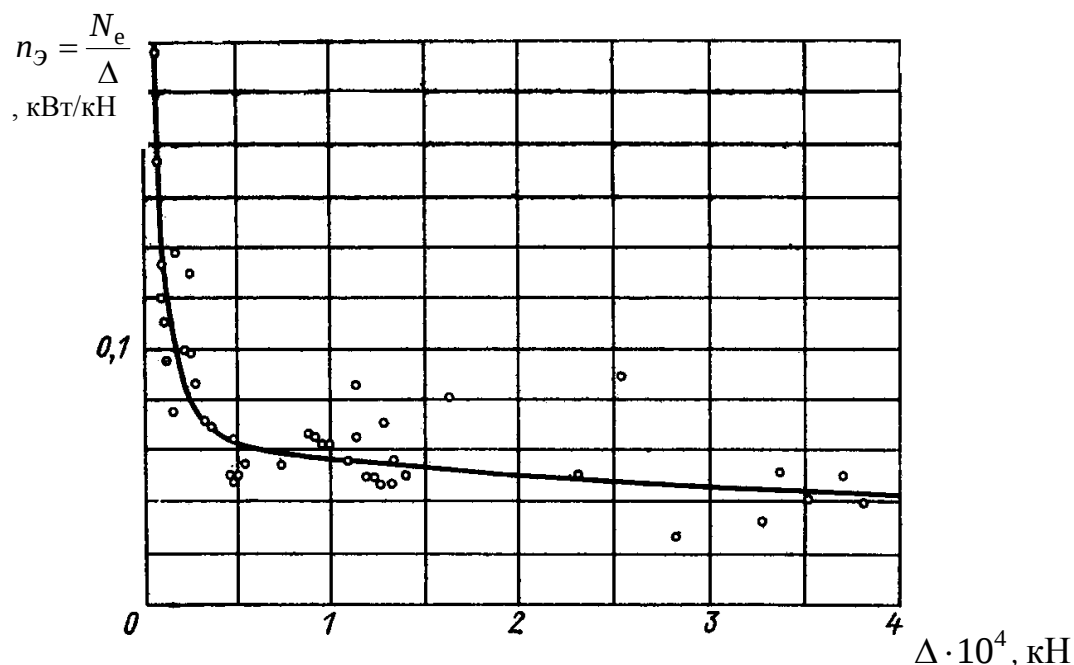


Рисунок 2.4 – Коэффициенты энерговооруженности промысловых судов

Таким образом, коэффициент энерговооруженности существенно снижается при увеличении водоизмещения малых судов, а влияние роста водоизмещения на $n_э$ – снижается. Формулу (2.20), с учетом формулы адмиралтейских коэффициентов C_A можно привести к виду

$$n_э = \frac{N_e}{\Delta} = \frac{1}{C_A} \cdot \frac{v_S^3}{\Delta^{1/3}}. \quad (2.21)$$

Эта формула показывает, что необходимая энерговооруженность весьма быстро растет с увеличением скорости хода судна и падает с увеличением водоизмещения судна.

Таким образом, оказывается, что на больших судах достижение заданной скорости хода покупается затратой меньшей мощности, отнесенной к одной тонне водоизмещения, чем достижение той же скорости на малых судах. Например, для китобойной базы «Советская Украина» водо-

измещением $\Delta = 44000$ тс. при скорости хода $v_s = 16$ узл, величина $n_3 \approx 0,22$ кВт/т, тогда как для китобойца водоизмещением $\Delta = 1200$ т, при той же скорости хода $n_3 \approx 1,84$ кВт/т.

Для линейного корабля водоизмещением $\Delta = 44000$ т, при скорости хода $v_s = 31$ уз. величина $n_3 \approx 2,43$ кВт/т, тогда как для эсминцев водоизмещением $\Delta = 1200$ т., при той же скорости хода $n_3 \approx 14,7$ кВт/т [51].

В практике проектирования грузовых транспортных судов величину потребной мощности главных механизмов иногда относят к 1 т. грузоподъемности судна; при проектировании буксиров величину мощности главных механизмов иногда относят к 1 тс. тягового усилия на буксирном гаке. Ясно, что в обоих этих случаях удовлетворительные результаты могут быть получены только при наличии близких судов-прототипов. Значения коэффициентов энерговооруженности для различных судов имеют весьма значительный разброс.

Формулу (2.20) можно рассматривать в виде $N_e = n_3 \cdot \Delta$, т.е. упрощенного уравнения мощности, если на основании анализа судов-прототипов задать в качестве параметра коэффициент энерговооруженности n_3 . Естественно, статистические данные n_3 не могут отражать той сложной зависимости между требуемой мощностью главных механизмов, скоростью хода, размерами и формой обводов проектируемого судна. Поэтому для более точных оценок мощности необходимы более точные и надежные методы определения мощности главных двигателей проектируемого судна.

2.2.3. Удельные затраты энергии на движение морских судов

В качестве показателя экономичности затрат энергии на движение морских судов примем величину удельных затрат энергии, расходуемой на выполнение единицы валовой транспортной работы морского судна в виде:

$$\eta_{\text{э}} = \frac{N_{\text{е}}}{\Delta \cdot v_{\text{э}}}, \quad (2.22)$$

где $v_{\text{э}}$ – эксплуатационная скорость хода, уз.

Отметим, что под чистой транспортной работой грузового судна обычно понимается провозная способность судна, зависящая от его чистой грузоподъемности [1]. При анализе же полных затрат энергии на движение морских судов необходимо рассматривать полное водоизмещение судна, исходя из расчетного случая нагрузки, принятого при проектировании данного судна. В этом случае удельные затраты энергии, расходуемой на выполнение единицы валовой транспортной работы будут сравнимы для всех типоразмеров судов различного назначения. Анализ показывает, что удельные затраты энергии морских судов существенно зависят от скорости хода, причем с ростом относительных скоростей хода судов (чисел Фруда), удельные затраты также интенсивно возрастают.

На рисунке 2.5 приведены статистические данные $\eta_{\text{э}} = f(Fr)$, обработанные для тихоходных морских грузовых судов, а также для малых морских судов прибрежного и портового плавания.

Из графика на рисунке 2.5 следует, что для всех рассмотренных типов судов существует разброс данных по удельным затратам энергии, при этом огибающая кривая $\eta_{\text{min}} = f(Fr)$ может быть описана параболой вида

$$\eta_{\text{min}} = 9 \cdot Fr^4. \quad (2.23)$$

Если для танкеров [35], особенно для супертанкеров, зависимость (2.23) дает весьма удовлетворительные результаты в сравнении со статистическими данными, то для лесовозов [26] разброс данных увеличивается. Разброс же для малых судов увеличивается весьма значительно. В то же время существуют отдельные суда, имеющие удельные затраты энергии ниже, чем определяемые по формуле (2.23).

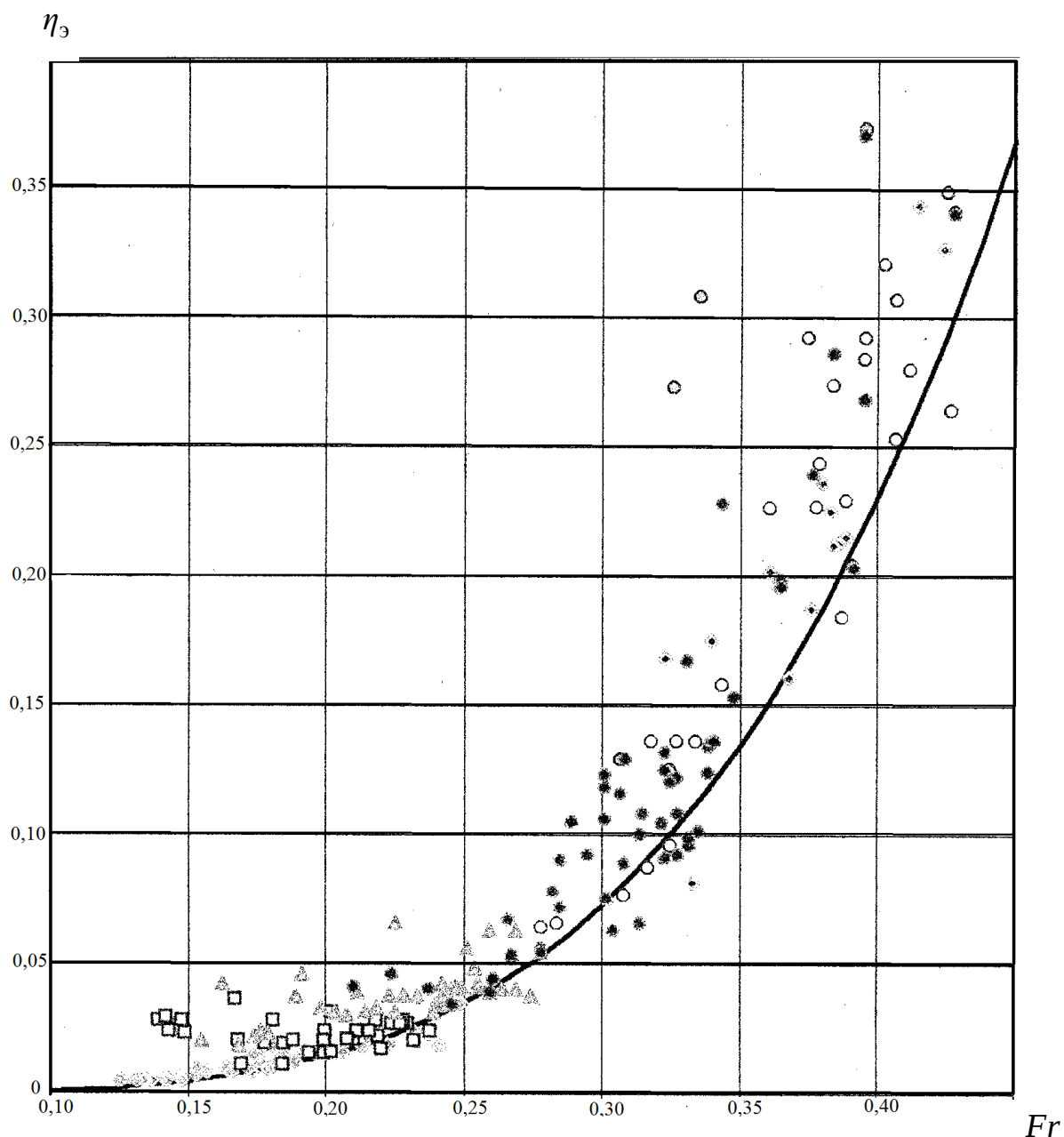


Рисунок 2.5 – Зависимость коэффициента удельных затрат энергии на движение от относительных скоростей хода тихоходных и малых морских судов

◇ – морские танкеры; □ – лесовозы; △ – малые грузовые суда прибрежного плавания; ○ – морские портовые буксиры; ◆ – малые пассажирские суда прибрежного плавания; ● – рыбопромысловые суда; — — расчетная кривая формулы (2.23)

Еще больший разброс данных наблюдается у малых грузовых судов прибрежного плавания, а особенно большой разброс наблюдается у рыбопромысловых судов [28, 55], морских и портовых буксиров [4] и малых пассажирских судов прибрежного плавания [33], причем, чем меньше размеры рассматриваемых судов, тем более значителен разброс данных по удельным затратам энергии. Отметим, что и для этих групп судов имеются отдельные лучшие суда, удельные затраты которых не только удовлетворяют формуле (2.23), но имеют еще даже меньшие значения.

Для сравнения, на рисунке 2.6 приведены статистические данные, $\eta_{\min} = f(Fr)$ обработанные для крупных судов [6, 40]. В этом случае, огибающая кривая описана параболой вида

$$\eta_{\min} = 6 \cdot Fr^4. \quad (2.24)$$

Из графика (рисунок 2.6), следует, что для всех рассматриваемых судов удельные затраты энергии в основном ниже, чем определяемые формулой (2.23). Для крупных морских транспортных судов также имеются и такие варианты, когда удельные затраты энергии значительно выше, чем у более удачных судов при тех же относительных скоростях хода.

Таким образом, анализ показывает, что при проектировании морских судов, удельным затратам энергии уделяется недостаточное внимание. Для снижения затрат энергии морских судов необходимо более внимательно подходить к подбору лучших судов-прототипов, а ***вновь проектируемые морские суда должны иметь, как правило, удельные затраты энергии ниже, чем уже существующие.***

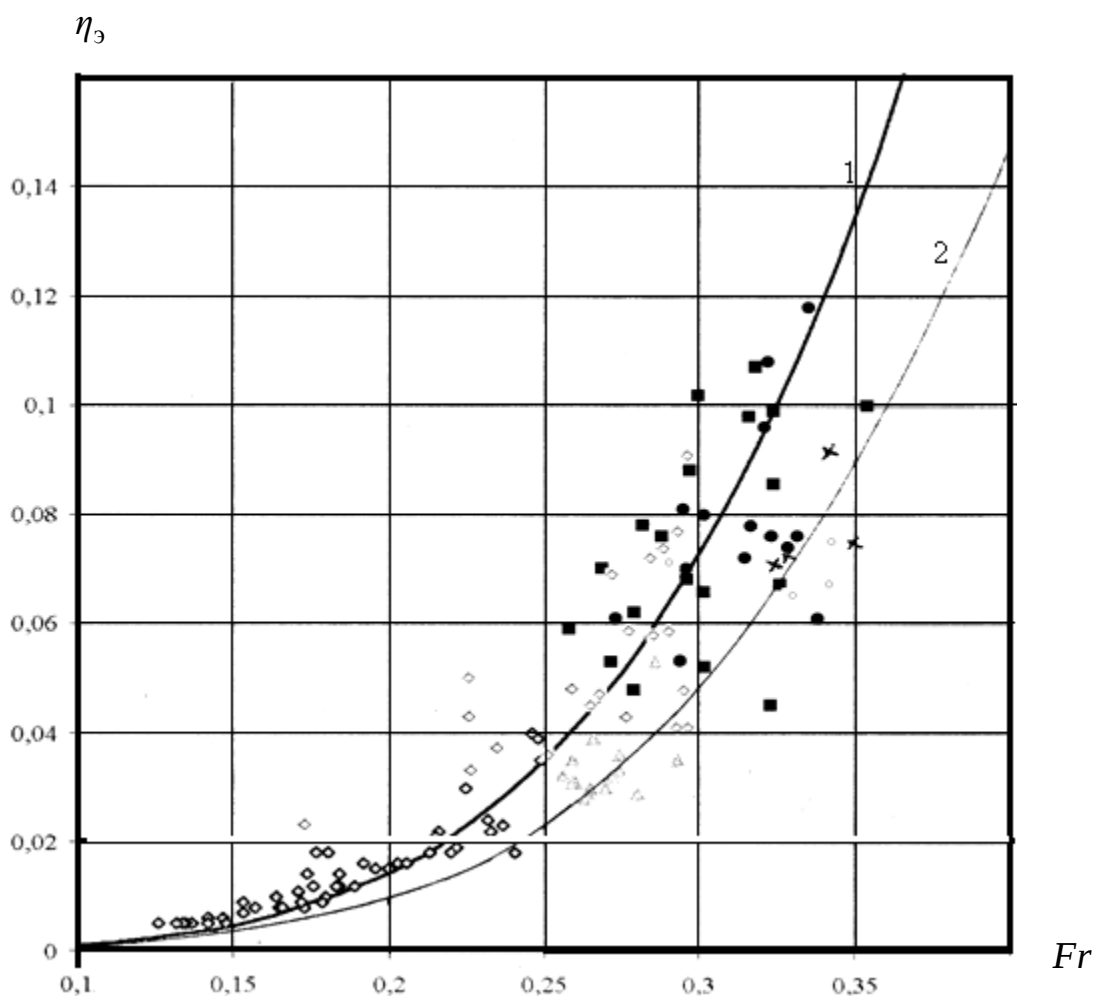


Рисунок 2.6 – Зависимость коэффициента удельных затрат энергии на движение от относительных скоростей хода среднескоростных и быстроходных морских судов

- $\diamond$ – морские танкеры; $\blacksquare$ – автомобильные пассажирские паромы;
 $\triangle$ – быстроходные грузовые лайнеры; $\circ$ – атомные авианосцы США;
 $\diamond$ – пассажирские круизные суда; $\bullet$ – грузопассажирские суда;
 $+$ – паротурбинные авианосцы; 1 – расчетная кривая формулы (2.23);
 2 – расчетная кривая формулы (2.24).

2.3. Уравнение весов и его разновидности

2.3.1. Общее понятие о нагрузке судна

Приведенное в общем виде уравнение весов (2.1) предполагает, что водоизмещение судна, равное весу судна со всеми находящимися на нём грузами, может быть разделено по тем или иным признакам на отдельные веса. Перечень таких весов, составленный в виде таблицы, носит название весовой нагрузки судна. В процессе проектирования судов составление нагрузки является одним из основных условий, так как знание общего веса судна необходимо для определения главных размерений проектируемого судна.

При разработке формы таблицы весовой нагрузки необходимо учитывать, по каким признакам должна производиться разбивка веса судна на отдельные статьи нагрузки.

Водоизмещение проектируемого судна, с точки зрения веса, может быть разделено на две основные составные части:

1. Собственный вес судна или водизмещение порожнем Δ_n , который можно считать постоянным (постоянные веса);
2. Вес переменных грузов P_o , находящихся на судне в том или другом количестве и меняющихся с течением времени и рейса. Сумма переменных весов обычно называется дедвейтом.

В настоящее время для транспортных судов принята следующая классификация понятия водоизмещения судов:

1. Водоизмещение порожнем, вес вполне законченного судна, готового для использования по назначению, но не имеющего полезного груза, различных судовых запасов, включая топливо и питательную воду, при так называемом мокром весе котлов и механизмов, т.е. с учётом жидкостей в них. Это понятие отвечает тому, что было названо нами выше собственным весом судна;

2. Водоизмещение в полном грузу, которое состоит из водоизмещения порожнем и веса полного количества перевозимых грузов, а также всех судовых запасов, включая топливо и питательную воду.

Водоизмещение в полном грузу для транспортных судов отвечает наибольшей осадке, т.е. осадке по грузовую марку, и является наибольшим водоизмещением.

При эксплуатации судов возможен целый ряд промежуточных и специальных случаев весовой нагрузки судов. Например, при эксплуатации транспортных судов практический интерес, кроме водоизмещения в полном грузу, представляют следующие случаи:

1. Судно с полным грузом, но с израсходованными полностью судовыми запасами, за исключением аварийных запасов.

2. Судно с полным грузом, но с израсходованными на половину судовыми запасами.

3. Судно без груза, но имеющее судовые запасы в половинном количестве.

4. Судно без груза и без судовых запасов, за исключением аварийных запасов.

Первые два случая для транспортных судов отвечают состоянию весовой нагрузки судов при прибытии в порт назначения, причём в первом случае предполагается, что судовые запасы были приняты из расчёта обеспечения только прямого рейса, а во втором случае предполагается, что указанные запасы были приняты на полный рейс. Третий и четвёртый случаи соответствуют условиям весовой нагрузки судов в порту прибытия перед постановкой их под новую погрузку, либо с израсходованными полностью запасами.

Рассмотрим наиболее характерные случаи весовой нагрузки для промысловых судов. Понятие водоизмещения порожнем для промысловых судов имеет тот же смысл, что и для транспортных судов. Понятие водоизмещения в полном грузу применимо для промысловых судов в редких

случаях и с эксплуатационной точки зрения соответствует варианту особенно удачного лова.

Основное отличие изменения переменных грузов на промысловых судах, по сравнению с транспортными, заключается в том, что полезный груз (рыба) принимается в грузовой трюм в море, по мере добычи рыбы, т.е. в течение промыслового времени. Промысловое время составляет обычно значительную часть от времени рейса. На транспортных судах приём и расходование полезного груза в море обычно не производится, за исключением судов, снабжающих экспедиционный промысел рыбы. Следовательно, промысловое судно может иметь полный полезный груз в трюмах только по истечении определённого времени. При этом судовые запасы будут частично израсходованы и этот случай не будет отвечать понятию водоизмещения в полном грузу.

Водоизмещение в полном грузу возможно только при работе сейнеров кошельковыми неводами, когда после приёма полного снабжения сейнер в первый же день может произвести удачный замет кошелькового невода и иметь улов рыбы, равный грузоподъёмности судна. При этом судовые запасы будут составлять 80 – 100 % от полных запасов. Однако такие случаи бывают редко.

С эксплуатационной точки зрения для промысловых судов практический интерес представляют следующие случаи нагрузки:

1. Выход судна на промысел с полными судовыми и промысловыми запасами.

2. Возвращение судна с промысла с полным грузом рыбы и минимальными запасами, т.е. при нормальном промысловом рейсе.

3. Возвращение судна с промысла с полным грузом рыбы и наибольшими возможными запасами, т.е. при удачном промысловом рейсе. Причём для различных промысловых судов, в зависимости от органи-

зации промысла и эффективности орудий лова, величина оставшихся запасов будет различна.

4. Возвращение с промысла с минимальным уловом (или без улова) и минимальными запасами, т.е. при неудачном промысловом рейсе.

Рассмотренные случаи нагрузки судов являются только некоторыми частными примерами. В практике могут иметь место и другие случаи нагрузки [54], вызванные теми или другими особенностями эксплуатации и постройки судов.

На первоначальной стадии проектирования судов, когда определяются в первом приближении главные размерения и элементы, обычно приходится иметь дело со случаем весовой нагрузки, наиболее полно отражающим связь водоизмещения с вместимостью и мощностью судна.

Для транспортных судов обычно рассматривается водоизмещение в полном грузу.

Для промысловых судов в качестве такого случая нагрузки обычно принимается случай возвращения с промысла с полным уловом и минимальными запасами (случай нормального лова).

Для судов, не имеющих трюма или имеющих трюм для вспомогательных целей, обычно рассматривается случай нагрузки при выходе на промысел или в рейс при полных запасах. К таким судам относятся сейнеры, буксиры и ледоколы.

Такое водоизмещение обычно называют расчётным водоизмещением, а осадку судна – конструктивной осадкой, хотя в отдельных случаях, оговариваемых в технических заданиях, в качестве расчётных могут приниматься и другие величины.

Разделение водоизмещения на собственный вес судна (водоизмещение порожнем) Δ_n и вес переменных грузов P_{∂} является удобным не только с точки зрения составления разных промежуточных случаев нагрузок судна, но и представляет практический интерес для судостроительного

производства, так как собственный вес судна является для производства более полноценным измерителем величины судов, чем их водоизмещение.

Однако при составлении весовой нагрузки даже в первоначальной стадии проектирования судов разделение проектного водоизмещения только на собственный вес судна Δ_n и вес переменных грузов P_o является недостаточным.

Каждое судно состоит из многочисленных конструкций, узлов и деталей. Поэтому необходимо решить, насколько далеко должна идти дифференциация судна на отдельные конструктивные элементы для составления его нагрузки.

Поскольку основным приёмом решения задачи проектирования судов является метод последовательных приближений, то на первоначальной стадии проектирования при составлении предварительной весовой нагрузки, целесообразно ограничиться малым числом разделов или групп (6 – 10) с последующим увеличением и дальнейшим подразделением их на группы и статьи по мере развития решения задачи в последующих приближениях.

Целесообразность такого приёма оправдывается тем, что обобщение групп весов производится только из статей нагрузки, имеющих одинаковые математические зависимости от водоизмещения, мощности и других качеств судна.

В начальной стадии проектирования обычно применяется группировка весов, входящих в состав расчётного водоизмещения, приведённая в таблице 2.2. В ней представлены также и буквенные обозначения весов, которыми мы будем пользоваться в дальнейшем.

Таблица 2.2 – Весовая нагрузка проектируемого судна

№ п/п	Наименование групп весов	Вес, кН	Вес в долях от Δ
1	Корпус с оборудованием	P_k	a_k
2	Механизмы	P_m	a_m
3	Промысловое и технологическое оборудование	$P_{об}$	$a_{об}$
	Водоизмещение порожнем	D_n	a_n
4	Полезный груз	P_z	a_z
5	Топливо и смазка	P_m	a_m
6	Судовое снабжение и экипаж	P_{cc}	a_{cc}
7	Промысловое и технологическое снабжение	P_{nc}	a_{nc}
	Дедвейт	P_d	a_d
8	Запас водоизмещения	P_z	a_z
	Проектное водоизмещение	Δ	$a_n + a_d + a_z = 1$

Вес корпуса с оборудованием – вес самого корпуса с оборудованием, а также с устройствами, системами и обслуживающими их механизмами. В эту группу весов входят все статьи нагрузки, которые не учтены в последующих группах весов 2 – 8, т.е. вес корпуса с оборудованием будет составлять разность между расчётным водоизмещением и суммой весов последующих групп нагрузки:

$$P_k = \Delta - \sum_{i=2}^{i=8} P_i. \quad (2.25)$$

Вес механизмов – вес оборудования судна, включающий главные судовые механизмы и котлы с валопроводами и винтами и все вспомогательные механизмы и устройства, необходимые для обслуживания главных механизмов и котлов. Часто в эту группу весов включают веса вспомогательных дизель-генераторов, котлов и соответствующего электрообо-

рудования, предназначенного для обеспечения электроэнергией и паром промысловых и технологических нужд судна. В этом случае под весом механизмов подразумевается вес всего машинного отделения судна.

Такая разбивка весов является более грубой, тем не менее, в первом приближении обычно точность расчётов бывает удовлетворительной, за исключением судов, имеющих большую насыщенность технологическим оборудованием.

Вес топлива – вес топлива, питательной воды и смазочных материалов в количестве, отвечающем принятому расчётному водоизмещению.

Вес технологического оборудования – вес всего промыслового оборудования (промысловые лебёдки, сетевыборочные машины, траловые дуги, сететрясные машины и прочее оборудование), а также вес технологического оборудования (рыборазделочные машины, холодильные установки, включая компрессорное отделение, рыбомучные и консервные установки и прочее оборудование).

На крупных промысловых судах (плавучих заводах) промысловое и технологическое оборудование необходимо подразделять на две самостоятельные группы.

Вес технологического снабжения – вес орудий лова, запасных сетей и оснастки орудий лова, лёд и тара для рыбы, а также вес всех расходных материалов, необходимых для обеспечения нормальной работы промыслового и технологического оборудования.

Вес полезного груза – вес перевозимого груза, либо полный вес рыбы или рыбных продуктов, размещённых в грузовых трюмах, с учётом веса тары, тузлука, льда и прочих материалов, использованных при упаковке и обработке рыбной продукции.

Вес судового снабжения – вес экипажа с багажом, вес провизии, питьевой и мытьевой воды, а также вес расходных материалов, необходимых

для нормальной эксплуатации судна (краски, строительные материалы, цемент, пластыри, аварийное снабжение и т.п.).

Запас водоизмещения – принимается при выборе главных размеров и основных величин судна в размере 3 – 5 % от проектного водоизмещения, с последующим снижением в дальнейших стадиях проектирования до 1 – 3 % от водоизмещения порожнем.

Запас водоизмещения является необходимым в связи с тем, что при постройке судна возможны некоторые отступления от первоначального проекта, а кроме того, возможны и просчёты в весах, обусловленные приближённостью тех приёмов, которые применяются для расчёта весов при проектировании судов. Также всегда возможна и некоторая перегрузка судов в процессе их постройки по самым различным причинам (недокат металла, избыток весов в отливках, замена одних материалов другими и т.д.).

2.3.2. Уравнение весов, выраженных в функции водоизмещения

Уравнение весов, составляющих водоизмещение, может быть использовано для решения задачи определения водоизмещения проектируемого судна в самых различных вариантах. Эти варианты обусловлены теми функциональными зависимостями от неизвестных и известных в задаче величин, которые могут быть установлены для отдельных весов, входящих в состав водоизмещения.

В первом приближении в качестве неизвестных величин принимают: водоизмещение судна Δ , его кубатура W и мощность главных механизмов N_e . В качестве известных величин в этом случае принимаются данные технического задания.

Вес любой статьи нагрузки P_i в общем случае зависит не только от указанных выше величин, но и от целого ряда других данных и в первую очередь от неизвестных геометрических размеров судна L, B, D .

Таким образом $P_i = F_i(x, y, z, \dots, a, b, c, \dots)$, где x, y, z – неизвестные в задаче величины и a, b, c – известные величины. Иначе $P_i = f_i(\Delta, W, N_e, x, y, z, \dots, a, b, c)$.

Рассмотрим ряд вариантов составления функциональных зависимостей общего уравнения весов.

2.3.3. Коэффициент утилизации водоизмещения

Предположим, что все веса нагрузки P_i , за исключением суммы известных $P_{нз}$, являются функцией только одной неизвестной величины Δ (водоизмещение) и не зависят от других величин.

Предположим также, что неизвестная нам функция P_i является линейной функцией от Δ в виде

$$P_i = \eta \Delta, \quad (2.26)$$

где η – весовой норматив, который называется относительным весом.

Наиболее часто эту зависимость применяют к статье нагрузки P_z , то есть полезной грузоподъемности в виде:

$$P_z = \eta_z \Delta, \quad (2.27)$$

где η_z – коэффициент утилизации водоизмещения судна по грузоподъемности.

Коэффициент утилизации водоизмещения является характеристикой технического совершенства проекта с точки зрения использования водоизмещения транспортного судна для назначенных целей.

Коэффициент утилизации водоизмещения может быть использован для приближённого определения искомого водоизмещения Δ , исходя из равенства

$$\Delta = \frac{P_z}{\eta_z}. \quad (2.28)$$

Для практического использования этой зависимости необходимо подыскать из числа построенных судов рассматриваемого типа такой прототип, для которого расчётная скорость хода, дальность плавания, продолжительность рейса, а также тип механизмов являются близкими к проектному заданию, и определить по данным нагрузки прототипа коэффициент утилизации водоизмещения η_z из предыдущего уравнения.

Величина коэффициента утилизации водоизмещения для различных типов современных судов изменяется в весьма широких пределах.

Для промысловых судов $\eta_z = 0,15 \div 0,40$.

Для рефрижераторных судов $\eta_z = 0,25 \div 0,50$.

Для сухогрузных судов $\eta_z = 0,30 \div 0,65$.

Для наливных судов $\eta_z = 0,40 \div 0,80$.

Нижние пределы коэффициента утилизации водоизмещения обычно относятся к малым судам. С увеличением водоизмещения коэффициент утилизации водоизмещения для однотипных судов имеет тенденцию к увеличению.

Для грузовых судов иногда в техническом задании в качестве заданной величины приводят дедвейт судна. В этом случае водоизмещение судна может определяться по коэффициенту утилизации по дедвейту в виде

$$\Delta = \frac{DW}{\eta_{DW}}, \quad (2.29)$$

где DW – дедвейт судна, η_{DW} – коэффициент утилизации водоизмещения по дедвейту.

2.3.4. Кубическое уравнение весов

Для получения более точного решения нашей задачи предположим, что зависимость (2.26) сохраняет свою силу только для таких весов, как

вес корпуса с оборудованием, судовое снабжение и запас водоизмещения, в соответствии с этим

$$P_{\Delta} = P_k + P_{cc} + P_z = (a_k + a_{cc} + a_z)\Delta = A\Delta. \quad (2.30)$$

Для определения веса механизмов используется зависимость

$$P_m = p_m N_e, \quad (2.31)$$

где N – мощность главных механизмов, которая рассчитывается по форму-

ле (2.11)
$$N_e = \frac{\Delta^{2/3} v_s^3}{C_A}.$$

Подставляя (2.11) в (2.31), получим

$$P_m = p_m \frac{\Delta^{2/3} v_s^3}{C_A}. \quad (2.32)$$

Соответственно вес топлива и смазки равен

$$P_m = p_m \cdot N_e \cdot \tau, \quad (2.33)$$

где τ – продолжительность рейса проектируемого судна; p_m – удельный расход топлива и смазки на 1 кВт/час главных и вспомогательных механизмов.

Используя формулу (2.33), получим

$$P_m = p_m \cdot \tau \cdot \frac{\Delta^{2/3} v_s^3}{C_A}. \quad (2.34)$$

Вес механизмов и топлива можно представить в виде

$$P_m + P_m = \left(p_m \cdot \frac{v_s^3}{C_A} + p_m \cdot \tau \cdot \frac{v_s^3}{C} \right) \cdot \Delta^{2/3} = B \cdot \Delta^{2/3}, \quad (2.35)$$

где
$$B = (p_m + p_m \cdot \tau) \cdot \frac{v_s^3}{C_A}.$$

К числу известных весов обычно относят вес полезного груза, вес технологического оборудования и снабжения

$$P_z + P_{TO} + P_{TC} = P_o. \quad (2.36)$$

Таким образом, уравнение весов можно представить

$$\Delta = A \cdot \Delta + B \cdot \Delta^{2/3} + P_o. \quad (2.37)$$

После преобразования получим

$$\Delta - \frac{B}{1-A} \cdot \Delta^{2/3} = \frac{P_o}{1-A}. \quad (2.38)$$

Для уравнения (2.38) воспользуемся подстановкой, предложенной академиком А.Н. Крыловым. Положим $\Delta = x^3$, соответственно $x = m y$, а также $m = \frac{B}{1-A}$ и $n = \frac{P_o}{1-A}$.

Производя подстановку, получим

$$y^3 - y^2 = \frac{n}{m^3}. \quad (2.39)$$

Рассмотрим частный случай уравнения (2.38), когда P_o является малой величиной по сравнению с остальными весами, что отвечает малым значениям коэффициента утилизации водоизмещения и относится к судам не имеющим трюм, или имеющим трюм для вспомогательных целей (буксиры, китобойцы и другие).

Полагая, что $P_o = 0$, будем иметь

$$\Delta = \left(\frac{B}{(1-A)} \right)^3. \quad (2.40)$$

Из (2.35) следует, что $B = v_s^3 (p_m + p_m \cdot \tau) \frac{1}{C}$, следовательно, подставляя значение B в уравнение (2.40), получим

$$\Delta = v_s^9 \cdot \left[\frac{p_m + p_m \cdot \tau}{C \cdot (1 - A)} \right]^3. \quad (2.41)$$

Таким образом, уравнение (2.41) показывает, что изменение скорости хода судна (для судов, не перевозящих грузов) оказывает весьма сильное влияние на величину водоизмещения.

Так, например, пусть скорость хода проектируемого судна $v_1 = 11$ уз, а судна-прототипа $v_0 = 10$ уз. Тогда, при сохранении геометрического подобия, получим

$$\frac{\Delta_1}{\Delta_0} = \left(\frac{v_1}{v_0} \right)^9, \text{ или } \frac{\Delta_1}{\Delta_0} = \left(\frac{11}{10} \right)^9.$$

Откуда $\Delta_1 = 2,36 \cdot \Delta_0$. Следовательно, водоизмещение проектируемого судна увеличится более чем в 2 раза.

2.3.5. Квадратное уравнение весов

Примем для определения мощности главного двигателя формулу В.В. Ашика $N_e = \frac{\Delta^{0,5} \cdot v_s^{2,5}}{C_{mn}}$. Вес главных механизмов при этом определяется

$$P_m = p_m \cdot \frac{\Delta^{0,5} \cdot v_s^{2,5}}{C_{mn}}, \quad (2.42)$$

соответственно вес топлива и смазки представим в виде

$$P_m = p_m \cdot \frac{\Delta^{0,5} \cdot v_s^{2,5}}{C_{mn}} \cdot \tau. \quad (2.43)$$

Вес механизмов и топлива определим по формуле

$$P_N = P_m + P_m = (p_m + p_m \cdot \tau) \cdot \frac{v_s^{2,5}}{C_{mn}} \cdot \Delta^{0,5} = B_1 \cdot \Delta^{0,5}, \quad B_1 = (p_m + p_m \cdot \tau) \frac{v_s^{2,5}}{C_{mn}}.$$

Таким образом уравнение весов примет вид

$$\Delta = A\Delta + B_1 \cdot \Delta^{0,5} + P_0 \quad (2.44)$$

или

$$\Delta - \frac{B_1}{1-A} \cdot \Delta^{0,5} = \frac{P_0}{1-A}. \quad (2.45)$$

Примем $m = \frac{B_1}{1-A}$ и $n = \frac{P_0}{1-A}$, а также $\Delta = x^2$ и $x = m \cdot y$, получаем

квадратное уравнение вида

$$y^2 - y = \frac{n}{m^2}. \quad (2.46)$$

Из произведённого анализа уравнения весов видно, что величина водоизмещения проектируемого судна при заданном полезном грузе определяется выбранными численными значениями различных весовых нормативов. Удельный вес механизмов p_m , а также удельный расход топлива и смазки p_m сохраняют свои величины для данного типа пропульсивной установки и не зависят от величины мощности.

Однако, предположение о постоянстве величин p_m и p_m является только приближённым. Величина удельного веса механизмов p_m для данного типа механизмов убывает с увеличением мощности N_e , а также зависит от типа двигателей (паровая или газовая турбина, дизель и т.д.) и степени их быстроходности. Величина удельного расхода топлива p_m при этом также изменяется.

Следовательно, к выбору указанных нормативов необходимо относиться очень внимательно. Лишь только для определённого типа главных двигателей, при небольшом различии в мощностях по сравнению с прототипом, можно принимать указанные нормативы за постоянную величину. При больших отступлениях от прототипа, например, при переходе на новый тип двигателей, удельный вес механизмов p_m , а также удельный рас-

ход топлива p_m необходимо определить на основании анализа однотипных двигателей близкой мощности других судов.

Таким образом, уравнение весов, составляющих водоизмещение, имеет многозначное решение, хотя общей тенденцией в проектировании судов и является обычно желание получить минимальное значение водоизмещения при соблюдении всех требуемых техническим заданием условий.

Рассмотренные выше формы уравнения весов, широко распространенные в практике проектирования судов, не являются единственно возможными. Различные формы этого уравнения обусловлены исключительно видом принимаемых зависимостей отдельных весов нагрузки от тех или других величин.

2.3.6. Дифференциальное уравнение весов

Процесс проектирования судов одним из неперенных условий предполагает решение задачи в ряде последовательных приближений. Поэтому изложенные приёмы являются неудобными, так как всякий раз при изменении тех или других величин, входящих в состав приведенных выше уравнений, приходится заново составлять и решать эти уравнения и составлять предварительную нагрузку.

Это неудобство исключается при дифференциальном способе, сущность которого заключается в нахождении приращения водоизмещения $d\Delta$ в зависимости от изменения ряда независимых переменных величин.

Уравнение весов, составляющих водоизмещение в общем виде

$$\Delta = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_i + \dots + P_n = \sum_{i=1}^n P_i. \quad (2.47)$$

Допустим, что любой из весов, входящих в это уравнение P_i в общем случае может быть выражен функцией

$$P_i = F_i(\Delta, x, y, z, \dots a, b, c \dots), \quad (2.48)$$

где Δ , x , y , z – неизвестные величины; a , b , c – известные величины.

Все эти величины, за исключением величины Δ , будем считать независимыми переменными. Допустим также, что какой-либо один из весов, входящих в состав водоизмещения, например, P_n является заданным весом и, следовательно, также будет независимой переменной величиной.

Используя уравнением (2.47) и принимая во внимание зависимость (2.48), полный дифференциал $d\Delta$ от обеих частей уравнения (2.47) будет иметь следующий вид

$$d\Delta = d\Delta \sum_{i=1}^n \frac{\partial P_i}{\partial \Delta} + dx \sum_{i=1}^n \frac{\partial P_i}{\partial x} + dy \sum_{i=1}^n \frac{\partial P_i}{\partial y} + \dots +$$

$$+ da \sum_{i=1}^n \frac{\partial P_i}{\partial a} + db \sum_{i=1}^n \frac{\partial P_i}{\partial b} + \dots + dP_n \quad (2.49)$$

Решая полученное уравнение относительно $\partial \Delta$, получим

$$d\Delta = \frac{dx \sum_{i=1}^n \frac{\partial P_i}{\partial x} + dy \sum_{i=1}^n \frac{\partial P_i}{\partial y} + \dots + da \sum_{i=1}^n \frac{\partial P_i}{\partial a} + db \sum_{i=1}^n \frac{\partial P_i}{\partial b} + \dots + dP_n}{1 - \sum_{i=1}^n \frac{\partial P_i}{\partial \Delta}} \quad (2.50)$$

Обозначим

$$\eta_n = \frac{1}{1 - \sum_{i=1}^n \frac{\partial P_i}{\partial \Delta}}, \quad (2.51)$$

где η_n – коэффициент Нормана.

Тогда формула (2.50) запишется в следующем виде

$$d\Delta = \eta_n \left(dx \sum_{i=1}^n \frac{\partial P_i}{\partial x} + dy \sum_{i=1}^n \frac{\partial P_i}{\partial y} + \dots + da \sum_{i=1}^n \frac{\partial P_i}{\partial a} + db \sum_{i=1}^n \frac{\partial P_i}{\partial b} + \dots + dP_n \right) \quad (2.52)$$

Для нахождения частных производных в выражениях (2.51) и (2.52) необходимо установить функциональные зависимости отдельных весов P_i от водоизмещения Δ и заданных величин $a, b, c \dots$

Для этого воспользуемся зависимостями формулы (2.30) уравнения весов, а именно:

$$\left. \begin{aligned} P_{\Delta} &= P_k + P_{cc} + P_z = A\Delta \\ P_m &= p_m \frac{\Delta^{2/3} v_s^3}{C} \\ P_m &= p_m \frac{\Delta^{2/3} v_s^3}{C} \cdot \tau \\ P_0 &= P_z + P_{об} + P_{nc} \end{aligned} \right\}. \quad (2.53)$$

Тогда уравнение (2.47) примет вид

$$\Delta = P_{\Delta} + P_m + P_m + P_0. \quad (2.54)$$

При этих условиях отдельные частные производные, входящие в уравнения (2.49), будут

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_{\Delta}}{\partial \Delta} &= A = \frac{P_k + P_{cc} + P_z}{\Delta}, & \frac{\partial P_m}{\partial \Delta} &= \frac{2}{3} p_m \frac{\Delta^{-1/3} \cdot v_s^3}{C} = \frac{2}{3} \frac{P_m}{\Delta}, \\ \frac{\partial P_m}{\partial \Delta} &= \frac{2}{3} p_m \frac{\Delta \cdot v_s^3}{C} \cdot \tau = \frac{2}{3} \frac{P_m}{\Delta}, & \frac{\partial P_m}{\partial v_s} &= 3 p_m \frac{\Delta^{2/3} \cdot v_s^2}{C} = 3 \frac{P_m}{v_s}, \\ \frac{\partial P_m}{\partial v_s} &= 3 p_m \frac{\Delta^{2/3} \cdot v_s^2}{C} \cdot \tau = 3 \frac{P_m}{v_s}, & \frac{\partial P_m}{\partial \tau} &= p_m \frac{\Delta^{2/3} \cdot v_s^3}{C} = \frac{P_m}{\tau}. \end{aligned} \quad (2.55)$$

В тех случаях, когда для проектируемого судна предполагается изменить по сравнению с прототипом величины адмиралтейского коэффициента «С» и весовых нормативов, следует добавить еще частные производные по этим величинам. Из уравнений (2.55) следует, что полученные частные производные имеют весьма простой вид и легко вычисляются по данным судна-прототипа.

Уравнение (2.52) для вычисления приращения водоизмещения в соответствии с выражениями для производных (2.55) примет вид:

$$d\Delta = \eta_H \left[3(P_M + P_m) \frac{dv_s}{v_s} + P_m \frac{d\tau}{\tau} + dP_0 \right], \quad (2.56)$$

где η_H – коэффициент Нормана

$$\eta_H = \frac{1}{1 - \frac{1}{\Delta_0} \left[P_K + P_{cc} + P_3 + \frac{2}{3}(P_M + P_m) \right]}. \quad (2.57)$$

Здесь $\Delta_0, P_K, P_{cc}, P_3, P_M, P_m$ – соответствуют данным судна-прототипа.

Таким образом, водоизмещение проектируемого судна составит

$$\Delta = \Delta_0 + d\Delta, \quad (2.58)$$

где Δ_0 – водоизмещение судна-прототипа.

Рассмотрим формулу для определения мощности главных двигателей в общем виде $N_e = \frac{\Delta^m \cdot v_s^n}{C_{mn}}$. Коэффициент Норманна в этом случае

можно привести к виду

$$\eta_H = \frac{1}{1 - (P_K/\Delta) - m \cdot \left(\frac{P_M + P_m}{\Delta} \right)}. \quad (2.59)$$

Дифференциальное уравнение весов при этом примет вид

$$d\Delta = \eta_H \cdot \left[\frac{n \cdot (P_M + P_m)}{v_s} dv_s + \frac{P_m}{\tau} d\tau + dP_0 \right]. \quad (2.60)$$

Пример 1. Определить водоизмещение универсального сухогруза.

Техническое задание:

независимые веса $P_{нз} = 11807$ т,

скорость хода $v_s = 14,6$ уз,

автономность

 $\tau = 29$ сут.

В качестве судна-прототипа примем универсальный сухогруз, проект 595: $\Delta_0 = 17772$ т, $P_K = 5176$ т, $P_M = 664$ т, $P_T = 2160$ т, $P_0 = 9772$ т, $v_s = 13,6$ уз, $\tau = 26$ сут.

Определяем приращения независимых переменных

$dv_s = 14,6 - 13,6 = 1,0$ уз., $d\tau = 29 - 26 = 3$ сут., $dP_0 = 11807 - 9772 = 2035$ т.

Коэффициент Нормана

$$\eta_H = \frac{1}{1 - \frac{5176}{17772} - m \cdot \frac{664 + 2160}{17772}} = \frac{1}{0,709 - 0,159 \cdot m}.$$

Приращение водоизмещения

$$d\Delta = \eta_H \cdot \left[\frac{n \cdot (664 + 2160)}{13,6} \cdot 1,0 + \frac{2160}{26} \cdot 3 + 2035 \right].$$

Дальнейшие расчёты сведём в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Определение водоизмещения универсального сухогруза

Формулы мощности	m	η_H	n	$d\Delta$, т	$\Delta = \Delta_0 + d\Delta$, т
$N_e = \frac{\Delta^{2/3} \cdot v_s^3}{C_A}$	0,67	1,661	3,00	4830	22602
$N_e = \frac{\Delta^{0.64} \cdot v_s^3}{C_{mn}}$	0,64	1,647	3,00	4789	22561
$N_e = \frac{\Delta^{0.56} \cdot v_s^{3.33}}{C_{mn}}$	0,56	1,613	3,33	4802	22574
$N_e = \frac{\Delta^{0.5} \cdot v_s^{3.25}}{C_{mn}}$	0,50	1,589	3,25	4703	22475
$N_e = \frac{\Delta^{0.5} \cdot v_s^3}{C_{mn}}$	0,50	1,589	3,00	4621	22393
$N_e = \frac{\Delta^{0.5} \cdot v_s^{2.5}}{C_{mn}}$	0,50	1,589	2,50	4456	22228

Из таблицы 2.3 следует, что расхождения в определении водоизмещения составляют

$$\delta_{\max} = \frac{22602 - 22228}{22228} \cdot 100 = 1,68\%.$$

Пример 2. Определить водоизмещение танкера.

Техническое задание:

независимые веса $P_{нз} = 45084$ т,

скорость хода $v_s = 13,6$ уз,

автономность $\tau = 46$ сут.

В качестве судна-прототипа примем танкер "Пекин": $\Delta_0 = 39720$ т, $v_s = 15,0$ уз, $\tau = 28$ сут, $P_{нз} = 27487$ т, $P_m = 1027$ т, $P_k = 8036$ т, $P_m = 3170$ т, $P_m + P_m = 4197$ т.

Определяем приращения независимых переменных

$$dv_s = 13,6 - 15,0 = -1,4 \text{ уз.},$$

$$d\tau = 46 - 28 = 18 \text{ сут.},$$

$$dP_0 = 45084 - 27487 = 17597 \text{ т.}$$

Коэффициент Нормана

$$\eta_n = \frac{1}{1 - \frac{8036}{39720} - m \cdot \frac{1027 + 3170}{39720}} = \frac{1}{0,798 - 0,106 \cdot m}.$$

Приращение водоизмещения

$$d\Delta = \eta_n \cdot \left[\frac{n \cdot (1027 + 3170)}{15,0} \cdot (-1,4) + \frac{3170}{28} \cdot 18 + 17597 \right].$$

Дальнейшие расчёты сведём в таблицу 2.4.

Таблица 2.4 – Определение водоизмещения танкера

Формулы мощности	m	η_H	n	$d\Delta$, т	$\Delta = \Delta_0 + d\Delta$, т
$N_e = \frac{\Delta^{2/3} \cdot \nu_s^3}{C_A}$	0,67	1,376	3,00	25400	65120
$N_e = \frac{\Delta^{0.64} \cdot \nu_s^3}{C_{mn}}$	0,64	1,370	3,00	25289	65009
$N_e = \frac{\Delta^{0.56} \cdot \nu_s^{3.33}}{C_{mn}}$	0,56	1,353	3,33	24800	64520
$N_e = \frac{\Delta^{0.5} \cdot \nu_s^{3.25}}{C_{mn}}$	0,50	1,342	3,25	24640	64360
$N_e = \frac{\Delta^{0.5} \cdot \nu_s^3}{C_{mn}}$	0,50	1,342	3,00	24772	64492
$N_e = \frac{\Delta^{0.5} \cdot \nu_s^{2.5}}{C_{mn}}$	0,50	1,342	2,50	25035	64755

Из таблицы 2.4 следует, что расхождения в определении водоизмещения составляют

$$\delta_{\max} = \frac{65120 - 64360}{64360} \cdot 100 = 1,18\%.$$

Коэффициент η_H является положительной величиной (> 1), так как стоящие в знаменателе $\sum_{i=1}^n \frac{\partial P_i}{\partial \Delta}$ всегда меньше единицы, если предположить, что $P_i = a_i \cdot \Delta^m$, где $0 \leq m \leq 1$.

Из уравнений (2.55) следуют три вида зависимостей

$$P_i = a_i \Delta^1, \quad (2.61)$$

$$P_i = a_i \Delta^{2/3}, \quad (2.62)$$

$$P_i = a_i \Delta^0. \quad (2.63)$$

Зависимость (2.61) предполагает, что отдельные статьи нагрузки судна меняются пропорционально линейному изменению водоизмещения. Если предположить, что все статьи нагрузки судна меняются по указанной зависимости, тогда

сумма $\sum_{i=1}^n \frac{\partial P_i}{\partial \Delta} = 1$, а коэффициент Нормана η_H будет стремиться к бесконечно-

сти. Поэтому у судов с большим относительным весом корпуса (крупные бронированные военные корабли, ряд промысловых и буксирных судов, не имеющих трюма) коэффициент η_H имеет высокие значения и доходит до 4...5,5.

Зависимость (2.62) предполагает, что отдельные статьи нагрузки судна меняются пропорционально $\Delta^{2/3}$. Если предположить, что все статьи нагрузки судна меняются по указанной зависимости, тогда сумма $\sum_{i=1}^n \frac{\partial P_i}{\partial \Delta} = \frac{2}{3}$, а коэффициент η_H будет стремиться к величине 3.

Зависимость (2.62) достаточно точно отображает закон изменения весов машинного отделения P_m и запасов топлива P_t , при изменении водоизмещения судна. Следовательно, для быстроходных военных, транспортных и промысловых судов, буксиров – спасателей, ледоколов, т.е. для судов, имеющих сравнительно высокий относительный вес машинного отделения и запасов топлива, коэффициент η_H будет стремиться к 3 (практически, для этой группы судов, коэффициент η_H находится в пределах 2,7...4).

Зависимость (2.63) предполагает, что отдельные статьи нагрузки меняются независимо от водоизмещения судна. Если предположить, что все статьи нагрузки судна меняются по указанной зависимости, тогда сумма, $\sum_{i=1}^n \frac{\partial P_i}{\partial \Delta} = 0$, а коэффициент η_H будет стремиться к единице. Данная зависимость относится к весу полезного груза, весу технологического оборудования и ряда других статей нагрузки. Очевидно, для судов, имеющих высокий коэффициент утилизации по грузоподъемности (крупные грузовые и наливные суда, баржи, лихтеры), а также для промысловых судов, имеющих большую насыщенность технологическим оборудованием (суда-заводы), коэффициент η_H будет иметь наиболее низкое значение (практически для этой группы судов η_H находится в пределах 1,2...1,7). Таким образом, коэффициент Нормана η_H показывает, во сколько раз увеличи-

вается приращение водоизмещения судна при изменении весов различных статей нагрузки судна.

Вычисление приращения водоизмещения $d\Delta$ по уравнению (2.60), рекомендуется вести табличным способом, представленным в таблице 2.5, при котором весьма просто получить также и нагрузку проектируемого судна. Таблица составлена применительно к формуле (2.60). В зависимости от постановки задачи число независимых переменных может меняться, соответственно и расчетная таблица также должна корректироваться. Некоторой особенностью вычислений, предусмотренных таблицей 2.5, является вычисление величин, помещаемых в столбце 9. Для заполнения всех граф этого столбца следует сначала вычислить приращение $d\Delta$, определив величину η_H по формуле (2.59), а затем уже заполнять другие строки этого столбца. Приращение водоизмещения $d\Delta$ определяется как суммированием приращений статей нагрузки столбца 12 по вертикали, так и суммированием по горизонтали итогов столбцов 8 – 11, что является контролем арифметической правильности произведенных вычислений. Указанное сходжение величины $d\Delta$ является только формальным следствием выражений (2.52 и 2.60). Степень точности приема Нормана с физической стороны зависит от того, в какой мере и для какого диапазона изменений являются справедливыми принятые нами зависимости вида (2.38), а также от величины изменений соответствующих параметров. Практика применения приема Нормана показывает, что при указанных зависимостях и при приращениях водоизмещения порядка $\pm 15\%$ от водоизмещения судна-прототипа этот прием дает практически точные результаты. Область применения приема Нормана при проектировании судов не ограничивается изложенным выше и является более широкой; в частности, этот прием дает возможность быстро исправить допущенные при проектировании ошибки, а также вносить изменения в задания проектируемого судна, для чего следует рассматривать само проектируемое судно в качестве прототипа для последующего приближения [1].

Таблица 2.5 – Определение водоизмещения судна по методу Нормана

№ п/п	Наименование статей нагрузки	Нагрузка прототипа P_i , кН	Функциональн. зависимости	Частные производные			Приращение весов				прираще- ние статей нагрузки dP_i	Нагрузка проектир. судна $P_{np} = P_i + dP_i$
				$\frac{\partial P_i}{\partial \Delta}$	$\frac{\partial P_i}{\partial v_s}$	$\frac{\partial P_i}{\partial t_p}$	незав- ые dP_0	$\frac{\partial P_i}{\partial \Delta} d\Delta$	$\frac{\partial P_i}{\partial v_s} dv_s$	$\frac{\partial P_i}{\partial t_p} dt_p$		
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
1	Корпус с оборудованием	P_κ	$P_\kappa = a_\kappa \Delta$	$\frac{P_\kappa}{\Delta}$	–	–	–	$\frac{P_\kappa}{\Delta} d\Delta$	–	–	dP_κ	$P'_\kappa = P_\kappa + dP_\kappa$
2	Механизмы	P_μ	$P_\mu = p_\mu \frac{\Delta^{2/3} v_s^3}{C}$	$\frac{2}{3} \frac{P_\mu}{\Delta}$	$3 \frac{P_\mu}{v_s}$	–	–	$\frac{2}{3} \frac{P_\mu}{\Delta} d\Delta$	$3 \frac{P_\mu}{v_s} dv_s$	–	dP_μ	$P'_\mu = P_\mu + dP_\mu$
3	Промысловое и технологое оборудование	$P_{об}$	независим.	–	–	–	$dP_{об}$	–	–	–	$dP_{об}$	$P'_{об} = P_{об} + dP_{об}$
	Водоизмещение порожнем	Δ_n	–	–	–	–	–	–	–	–	$d\Delta_n$	$\Delta'_n = \Delta_n + d\Delta_n$
4	Полезный груз	P_z	независим.	–	–	–	dP_z	–	–	–	dP_z	$P'_z = P_z + dP_z$
5	Топливо	P_m	$P_m = p_m \frac{\Delta^{2/3} v_s^3}{C} t_p$	$\frac{2}{3} \frac{P_m}{\Delta}$	$3 \frac{P_m}{v_s}$	$\frac{P_m}{t_p}$	–	$\frac{2}{3} \frac{P_m}{\Delta} d\Delta$	$3 \frac{P_m}{v_s} dv_s$	$\frac{P_m}{t_p} dt_p$	dP_m	$P'_m = P_m + dP_m$
6	Судовое снабже- ние	P_{cc}	$P_{cc} = a_{cc} \Delta$	$\frac{P_{cc}}{\Delta}$	–	–	–	$\frac{P_{cc}}{\Delta} d\Delta$	–	–	dP_{cc}	$P'_{cc} = P_{cc} + dP_{cc}$
7	Промысловое и технологич. снабжение	P_{nc}	независим.	–	–	–	dP_{nc}	–	–	–	dP_{nc}	$P'_{nc} = P_{nc} + dP_{nc}$
	Дедвейт	P_δ	–	–	–	–	–	–	–	–	dP_δ	$P'_\delta = P_\delta + dP_\delta$
8	Запас водоизмещения	P_3	$P_3 = a_3 \Delta$	$\frac{P_3}{\Delta}$	–	–	–	$\frac{P_3}{\Delta} d\Delta$	–	–	dP_3	$P'_3 = P_3 + dP_3$
	Проектное водоизмещение	Δ_0	–	$\sum \frac{\partial P_i}{\partial \Delta}$	$\sum \frac{\partial P_i}{\partial v_s}$	$\sum \frac{\partial P_i}{\partial t_p}$	dP_0	$\sum \frac{\partial P_i}{\partial t_p} d\Delta$	$\sum \frac{\partial P_i}{\partial v_s} dv_s$	$\sum \frac{\partial P_i}{\partial t_p} dt_p$	$d\Delta$	$\Delta = \Delta_0 + d\Delta$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\Delta = \sum P_i$ $\Delta = \Delta_0 + d\Delta$

2.3.7. Подбор судов-прототипов при определении водоизмещения проектируемого судна

При использовании судна-прототипа широко распространённым методом определения основных элементов проектируемого судна служит дифференциальный метод Нормана.

По уравнению Нормана водоизмещение проектируемого судна Δ определяется как

$$\Delta = \Delta_0 + d\Delta,$$

где Δ_0 – водоизмещение судна-прототипа, т; $d\Delta$ – приращение водоизмещения, зависит от изменения характеристик проекта по сравнению с прототипом.

Если принять, что

$$\Delta = P_K + P_M + P_Z + P_{CC} + P_m + P_z + P_{ЭК.СН}, \quad (2.64)$$

где P_K – вес корпуса, кН; P_M – вес энергетической установки, кН; P_Z – вес груза, кН; P_{CC} – вес судового снабжения, кН; P_m – вес топлива, кН; P_z – запас водоизмещения, кН; $P_{ЭК.СН}$ – вес экипажа со снабжением, кН, то при использовании формулы мощности, вида

$$N_e = \frac{\Delta^{0,5} \cdot v_s^{2,5}}{C_{mn}}, \quad (2.65)$$

где C_{mn} – определяемый по судну-прототипу коэффициент; v_s – расчетная скорость хода, уз; N_e – мощность энергетической установки, кВт, приращение водоизмещения проектируемого судна можно определить по выражению

$$d\Delta = \eta_H \cdot \left(\frac{2,5 \cdot (P_M + P_m)}{v_s} \cdot dv_s + \frac{P_m}{\tau} d\tau + dP_{H3} \right), \quad (2.66)$$

где $\eta_H = \frac{2\Delta}{2P_0 + P_M + P_T}$ – коэффициент Нормана; dv_s – приращение скорости

хода между прототипом и проектом, уз; $d\tau$ – приращение автономности по

топливу между прототипом и проектом, сут.; $dP_0 = dP + dP_{cc} + dP_{эк.сн}$ – приращение массы груза, судового снабжения и экипажа со снабжением, кН; v_s – скорость хода судна-прототипа, уз.; τ – автономность по топливу судна-прототипа, сут.

Рассмотрим влияние характеристик судна-прототипа на конечный результат определения водоизмещения на примере танкеров. Основные характеристики танкеров приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Основные характеристики танкеров

Наименование судов, год постройки, страна-строитель, лед. класс судна	Δ_0 , т. прототип	DW , т	N_e , кВт	v_s , уз	τ , сут	Δ , т. проект	Ошибка %%
1. "Казбек", 1951, СССР, Л	16250	11800	2940	13,80	33	45971	0,9
2. "Апшерон", 1952, Дания	18100	13200	4070	14,50	29	45784	0,5
3. "Великий Октябрь", 1967, СССР, Л	22100	16300	6620	16,60	38	46168	1,3
4. "Бауска", 1962, Польша	25400	18150	5735	15,20	47	48182	5,7
5. "Florida", 1953, США	25900	19500	11030	19,50	26	44870	1,5
6. "Сплит", 1965, Югославия	28220	20740	8820	17,10	40	46809	2,7
7. "Адлер", 1960, Нидерланды	32970	25250	6910	15,80	32	44255	-2,9
8. "Труд", 1961, Югославия	33700	25330	9190	17,00	15	45121	-1,0
9. "Пекин", 1959, СССР, Л	40150	30900	13970	18,70	23	45000	1,3
10. "Дж.Гарибальди", 1960, Италия	41630	32120	10660	16,10	41	45539	0,1
11. "Луганск", 1962, Япония	45575	34985	13235	17,20	36	45575	0
12. "Лисичанск", 1962, Япония	45840	34640	13235	17,50	33	46030	1,0
13. "W/Alton Jones", 1954, США	50500	39550	16200	18,80	27	39644	-13,0
14. "Мир", 1960, Япония	51820	39720	11765	17,30	49	44669	-2,0
15. "G.S.Livanos", 1958, США	53100	41900	16200	18,35	27	44204	-3,0
16. "Дружба", 1960, Япония	53275	40715	11765	16,90	32	45284	-0,6
17. "София", 1963, СССР, Л	62600	49370	13970	17,00	25	44530	-2,3
18. "Леонардо да Винчи", 1963, Италия	64220	48930	13970	17,30	24	45875	0,7
19. "Победа", СССР, Л	76880	68280	13600	16,10	31	44445	-2,5
20. "Sansinena", 1958, США	78400	61600	18400	18,35	27	44680	-2,0

В качестве проектируемого судна примем танкер типа "Луганск", построенного в Японии по заказу СССР в 1962 году. Его характеристики:

водоизмещение $\Delta = 45575$ т;

дедвейт $DW = 34985$ т;

мощность энергетической установки $N_e = 13235$ кВт;

скорость хода $v_s = 17,2$ уз.;

автономность по топливу $\tau = 36$ сут.

Ошибка % от Δ

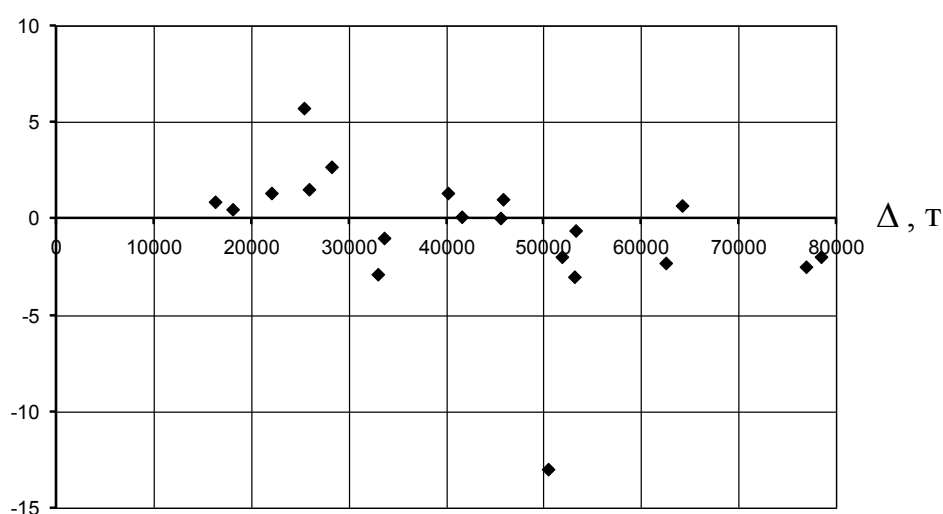


Рисунок 2.7 – Процент ошибки от Δ при пересчете с судов-прототипов (танкеров) в широком диапазоне

Итак, принимая каждый из перечисленных в таблице 2.6 танкеров за судно-прототип, по формуле (2.66) определим приращение водоизмещения проектируемого судна, а затем по формуле $\Delta = \Delta_0 + d\Delta$ и само водоизмещение, представленное в таблице 2.6 как водоизмещение проекта. В качестве технического задания при этом приняты данные танкера «Луганск». Отметим, фактическое водоизмещение танкера «Луганск» равно 45575 т, поэтому в таблице 2.6 приведен процент ошибки расчетного водоизмещения для различных судов-прототипов, а на рисунке 2.7 приведен график

характеризующий процент ошибки Δ при пересчете с судов-прототипов (танкеров) в широком диапазоне. Из графика на рисунке 2.7 следует, что процент ошибки при определении водоизмещения проекта Δ при значительных отклонениях по водоизмещению судов-прототипов не превышает 3 % от Δ , за исключением танкеров «Бауска» и «W/Alton Jones», построенного по заказу ВМС США, то это судно существенно отличается по целевому назначению и имеет более высокую скорость 18,8 уз., но не типичную для обычных гражданских судов. Что касается отклонения 5,8 % от водоизмещения для танкера «Бауски», то оно требует более глубокого исследования.

2.3.8. Особенности определения водоизмещения при проектировании малых морских судов

Главной особенностью для большинства малых морских судов является отсутствие грузового трюма, т.е. $P_z = 0$. Кроме того, при проектировании малых судов чаще всего задается мощность главного двигателя и следовательно, вес машинного отделения и топлива переходят в разряд независимых P_0 статей нагрузки.

Уравнение весов, например, буксирного судна выразим в виде:

$$\Delta = P_k + P_m + P_t + P_{cc}, \quad (2.67)$$

где P_k – вес корпуса с оборудованием, кН; P_m – вес энергетической установки, кН; P_t – вес запасов топлива, кН; P_{cc} – вес судового снабжения, кН.

Уравнение весов в этом случае можно представить в виде

$$\Delta = P_\Delta + P_0, \quad (2.68)$$

где P_Δ – веса, определяемые в функции водоизмещения проектируемого судна; P_0 – веса определяемые, как независимые от водоизмещения проектируемого судна.

Применительно к рассматриваемой задаче следует принять

$$P_{\kappa} = a_{\kappa} \cdot \Delta; P_M = p_M \cdot N_e; P_T = k_M \cdot \tau \cdot p_T \cdot N_e,$$

где a_{κ} – измеритель веса корпуса с оборудованием, определяемый по данным нагрузки близких судов-прототипов; p_M – измеритель веса энергетической установки, т/кВт; N_e – мощность главного двигателя судна, кВт; k_M – коэффициент морского запаса; τ – автономность плавания, сут; p_T – удельный расход топлива, т/кВт сут.

В расчете нагрузки проектируемого судна вес судового снабжения P_{cc} , включая вес экипажа с багажом, обычно определяется по соответствующим нормам для каждого типа буксирных судов, с учетом района и автономности плавания. Поэтому раздел нагрузки P_{cc} в уравнении весов (2.67) обычно включают в раздел независимых весов P_0 .

Для определения мощности энергетической установки на ранних стадиях проектирования примем формулу вида [1]:

$$N = \frac{\Delta^{0,5} \cdot v_s^{2,5}}{C_{mn}},$$

где C_{mn} – коэффициент, величина которого имеет сравнительно устойчивое значение и определяется по данным близких судов прототипов; v_s – скорость свободного хода, уз.

В этом случае уравнение весов (2.67) примет вид

$$\Delta = a_{\kappa} \cdot \Delta + p_M \cdot \frac{\Delta^{0,5} \cdot v_s^{2,5}}{C} + k_M \cdot \tau \cdot p_T \cdot \frac{\Delta^{0,5} \cdot v_s^{2,5}}{C} + P_0.$$

В таблице 2.7 приведены основные статьи укрупненной нагрузки ряда буксирных судов [4].

Таблица 2.7 – Характеристики буксирных судов

Наименование судов, класс лед. подкрепл.	N_e , кВт	Δ_0 , т.	v_s , уз.	P_K , т.	P_M , т.	P_T , т.	P_{cc} , т.
1. Голиаф, УЛ	1618	1220	15,0	557	227	211	81
2. Атлант, УЛ	1618	1205	14,4	608	204	332	33
3. Иван Плюсин, УЛ	1470	935	13,0	504	182	170	50
4. Стремительный, УЛ	882	772	12,8	422	115	182	40
5. Кутузов, Л	882	470	12,5	245	111	76	27
6. Сатурн, УЛ	882	303	12,0	174	70	40	6
7. Рейд, УЛ	441	186	10,5	109	47	19	3
8. Марс	441	170	9,5	92	48	20	3
9. Крепыш, Л	220	63	10,0	40	13	7	2
10. Олег Кошевой, Л	220	53	9,5	33	11	6	2
11. Прибой, Л	220	43	10,0	25	7	9	2

Из работы [4] принято $P_K = K_p + C_m$; $P_M = M_{ш} + \mathcal{E}_л$; $P_{cc} = C_n$; $P_T = T_n$.

Представим уравнение весов в дифференциальной форме

$$d\Delta = \eta_H \cdot \left(\frac{2,5 \cdot (P_M + P_T)}{v_s} \cdot dv_s + \frac{P_T}{\tau} d\tau + dP_0 \right),$$

$$\text{где } \eta_H = \frac{1}{1 - \frac{P_K}{\Delta} - \frac{1}{2} \cdot \frac{P_M + P_T}{\Delta}}.$$

Пример. Определить водоизмещение проектируемого судна по техническому заданию: $P_0 = P_{cc} = 27$ т; $P_M = 111$ т; $P_T = 76$ т; $N_e = 882$ кВт; $v_s = 12,5$ уз; $\tau = 12,3$ сут. (данные технического задания соответствуют характеристикам буксира "Кутузов" из таблицы 2.7).

В качестве судна-прототипа принят буксир "Стремительный" (см. таблицу 2.7), имеющий данные: $\Delta_0 = 772$ т; $P_{M_0} = 155$ т; $P_{T_0} = 182$ т; $P_{K_0} = 422$ т; $N_e = 882$ кВт; $P_{H3} = P_{CC} = 40$ т; $v_s = 12,8$ уз; $\tau_0 = 29,5$ сут.

Порядок расчета:

$$\eta_H = \frac{1}{1 - \frac{422}{772} - \frac{1}{2} \cdot \frac{115 + 182}{772}} = 3,83; \quad dP_0 = 27 - 40 = -13 \text{ т};$$

$$dv_s = 12,5 - 12,8 = -0,3 \text{ уз}; \quad d\tau = 12,3 - 29,5 = -17,2 \text{ сут};$$

$$d\Delta = 3,83 \cdot \left(\frac{2,5 \cdot (115 + 182)}{12,8} \cdot (-0,3) + \frac{182}{29,5} \cdot (-17,2) - 13 \right) = -521 \text{ т}.$$

$$\Delta = 772 - 521 = 251 \text{ т}.$$

Фактически $\Delta = 470$ т (см. таблицу 2.7, буксир "Кутузов"). Ошибка $\delta = \frac{251 - 470}{470} \cdot 100 = -46,6 \%$.

Отметим, что проектируемое судно (буксир "Кутузов") и судно-прототип "Стремительный" имеют одинаковую мощность $N_e = 882$ кВт, тем не менее, ошибка при определении водоизмещения имеет весьма большую величину.

Еще в работе [1] В.В. Ашик отмечал, что при проектировании буксиров и толкачей обычно задаётся их мощность. В этом случае вес $P_M = p_M \cdot N_e$ и вес $P_T = p_T \cdot k_M \cdot \tau \cdot N_e$ становятся независимыми от водоизмещения величинами. Тогда

$$P_{H3} = P_M + P_T + P_{CC}. \quad (2.69)$$

Уравнение весов в этом случае примет вид

$$\Delta = P_K + P_0.$$

Соответственно коэффициент Нормана определится как

$$\eta_n = \frac{1}{1 - \frac{P_k}{\Delta}}. \quad (2.70)$$

Таким образом, для рассматриваемого выше примера коэффициент Нормана (2.70) определится $\eta_n = \frac{1}{1 - \frac{422}{772}} = 2,21$.

Независимые веса проекта $P_0 = 111 + 76 + 27 = 214$ т.

Независимые веса прототипа $P_0 = 115 + 182 + 40 = 337$ т.

Соответственно $dP_0 = 214 - 337 = -123$ т.

Приращение водоизмещения будет равно

$$d\Delta = \eta_n \cdot dP_0 = 2,21 \cdot (-123) = -272 \text{ т.}$$

Водоизмещение проектируемого судна равно

$$\Delta = \Delta_0 + d\Delta = 772 - 272 = 500 \text{ т.}$$

Итак, ошибка $\delta = \frac{500 - 470}{470} \cdot 100 = 6,4\%$.

Для повышения точности расчетов в дальнейшем воспользуемся методом последовательных приближений (итераций). Учитывая, что водоизмещение судов-прототипов часто существенно отличается от водоизмещения проектируемого судна (в данном случае $\Delta_0 = 772$ т и $\Delta = 470$ т, т.е. на 62,3 %) по данным таблицы 2.7 построен график $a_k = f(\Delta)$, изображенный на рисунке 2.8.

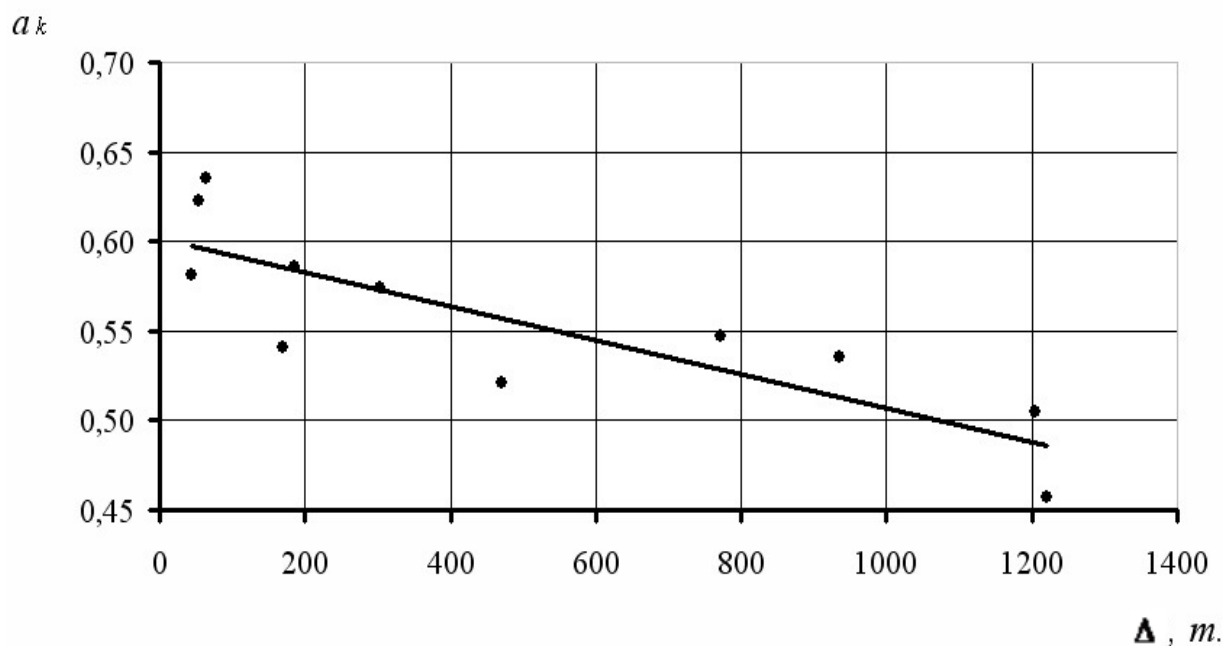


Рисунок 2.8 – Зависимость $a_k = f(\Delta)$

Уравнение прямой, показанной на графике, имеет вид

$$a_k = 0,6 - \frac{\Delta}{11000}. \quad (2.71)$$

Отмеченные точками на рисунке 2.8 значения a_k для ряда буксирных судов свидетельствуют о том, что принятая зависимость (2.71) достаточно хорошо отображает качественную сторону изменения относительного веса корпуса с оборудованием при увеличении водоизмещения судна. По данным конкретных проектов судов [4] количественная оценка относительной ошибки величины a_k , вычисленной по формуле (2.71), приводится в таблице 2.8.

Второе приближение состоит в следующем.

Определим значения a_k по формуле (2.71) $a_k = 0,6 - \frac{500}{11000} = 0,554$.

Соответственно, коэффициент Нормана определится $\eta_n = \frac{1}{1 - 0,554} = 2,24$.

Вес корпуса с оборудованием будет равен

$$P_{k0} = a_k \cdot \Delta = 0,554 \cdot 500 = 277 \text{ т.}$$

Независимые веса судна-прототипа

$$P_0 = \Delta - P_k = 500 - 277 = 223 \text{ т.}$$

Приращение независимых весов определим как

$$\Delta P_0 = P_0 - P_{0_0} = 214 - 223 = -9 \text{ т.}$$

Приращение водоизмещения проектируемого судна будет равно

$$d\Delta = \eta_n \cdot \Delta P_0 = 2,24 \cdot (-9) = -20 \text{ т.}$$

Водоизмещение проектируемого судна во втором приближении будет равно

$$\Delta = \Delta_0 + \delta\Delta = 500 - 20 = 480 \text{ т.}$$

$$\text{Ошибка } \delta = \frac{480 - 470}{470} \cdot 100 = 2,1\%.$$

Выполним третье (контрольное) приближение

$$a_k = 0,6 - \frac{480}{11000} = 0,556; \eta_n = \frac{1}{1 - 0,556} = 2,30; P_{k_0} = 0,556 \cdot 480 = 267 \text{ т;}$$

$$P_{0_0} = 480 - 267 = 213 \text{ т; } dP_0 = 214 - 213 = 1 \text{ т; } d\Delta = 2,3 \cdot 1 = 2 \text{ т;}$$

$$\Delta = 480 + 2 = 482 \text{ т.}$$

Итак, третье (контрольное) приближение показывает хорошую сходимость ряда.

$$\text{Ошибка при этом } \delta = \frac{482 - 470}{470} \cdot 100 = 2,5\%.$$

В таблице 2.8 представлены значения водоизмещения проектируемого судна при вышеуказанном техническом задании (буксир "Кутузов") для ряда судов-прототипов, определяемые по изложенной методике. Из полученных данных таблицы 2.8 следует, что водоизмещение проектируемого судна определяется достаточно точно.

Таблица 2.8 – Значения массы корпуса с оборудованием P_k

Наименование судов, класс лед. подкрепл.	$\Delta_0,$ т	$P_k,$ т	a_k	a_k по (2.71)	$\delta,$ ошиб- ка для a_k	$d\Delta,$ т	$\Delta,$ т. проект	$\delta,$ ошибка Δ
1. Голиаф, УЛ	1220	557	0,457	0,486	7,0	-739	481	2,3
2. Атлант, УЛ	1205	608	0,505	0,491	-2,9	-723	482	2,5
3. Иван Плюсин, УЛ	935	504	0,535	0,515	-4,4	-453	482	2,5
4. Стремительный, УЛ	772	422	0,547	0,530	-3,1	-290	482	2,5
5. Кутузов, Л (проект)	470	245	0,521	0,557	7,0	0	470	0,0
6. Сатурн, УЛ	303	174	0,574	0,573	-0,2	178	481	2,3
7. Рейд, УЛ	186	109	0,586	0,583	-0,5	299,5	482,5	2,7
8. Марс	170	92	0,541	0,584	8,0	312	482	2,5
9. Крепыш, Л	63	40	0,635	0,594	-6,4	305	475	1,1
10. Олег Кошевой, Л	53	33	0,623	0,595	-4,5	430	483	2,8
11. Прибой, Л	43	25	0,581	0,596	2,6	439	482	2,5

2.4. Уравнение объемов, составляющих кубатуру судна.

Разработка эскизов общего расположения проектируемого судна

2.4.1. Полная теоретическая вместимость судна

Размещение всех помещений на проектируемом судне составляет довольно сложную, объёмную задачу. Отметим, различные численные характеристики вместимости в настоящее время ещё не накоплены в достаточном количестве с необходимой точностью, как это выполнено, например, по нагрузке судна, хотя для каждого судна, при проектировании обязательно строятся эпюры ёмкости (рисунок 2.9), аналогичные строевой по шпангоутам. Анализ таких эпюр способствует накоплению необходимых данных по вместимости судов [1].

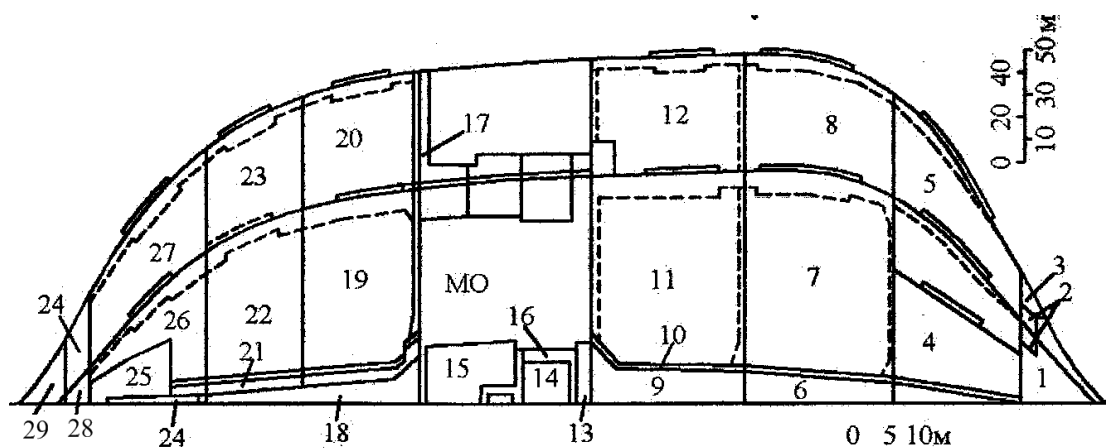


Рисунок 2.9 – Эпюра ёмкости сухогрузного судна

- 1 – котельное топливо; 2 – цепной ящик; 3 – запасы;
 4, 7, 11, 19, 22, 26 – трюмы; 5, 8, 12, 20, 23, 27 – твиндеки;
 6, 9, 15, 18 – топливо; 10, 21 – лялы; 13 – сливная цистерна;
 14 – котельная вода; 16, 17 – коффердам; 24 – питьевая вода;
 25 – рецесс; 28 – балласт; 29 – кабельный ящик

Эпюра ёмкости показывает, как распределяется вместимость по длине судна. Распределение вместимости по высоте характеризует строевая по ватерлиниям, продолженная по высоте до верхней палубы, с учетом седловатости и погиби бимсов.

Международная конвенция по обмеру судов, 1969 (International Convention on Tonnage Measurement of Ships (TONNAGE-69)) принята в 1969г., вступила в силу в 1982 г., ратифицирована Украиной в 1994 г.

Конвенция – первая успешная попытка применить универсальную систему обмера судов. Принцип системы – это определение количества груза, которое судно может перевезти в зависимости от объема его помещений, установление единицы вместимости судна – регистровой тонны, которая равна 100 куб футов (2,83 куб. метра). Система была необходима для характеристики судна, его транспортных возможностей. На 12-й сессии ИМО в 1981 г. Ассамблея призвала заинтересованные правительства обратиться к Администрации Суэцкого канала и Дирекции Панамского канала с тем, чтобы при проходе этих каналов признавали Мерительное сви-

детельство 1969 г. для определения сборов, взимаемых за проход каналом (при наличии таких свидетельств на борту судна).

Валовую вместимость (БРТ) используют для вычисления сборов, налогов и плат за услуги, оказываемые судну, для определения условий страхования, требований к навигационному оборудованию, численности экипажа, требований к уровню квалификации командного состава.

$$GT = K_1 W,$$

где W – общий объем всех закрытых пространств на судне, м^3 ; K_1 – коэффициент, определяемый как:

$$K_1 = 0,2 + 0,02 \lg W.$$

Чистая вместимость судна NT определяется формулой

$$NT = K_2 W_C \left(\frac{4d}{3D} \right)^2 + K_3 \left(\frac{N_2}{10} + N_1 \right),$$

где W_C – общий объем грузовых пространств, м^3 (снимается с масштаба Бонжана, но не для всего судна, а только для грузовых помещений); d – теоретическая осадка судна, м, соответствующая летней грузовой марке; D – теоретическая высота борта; K_2 и K_3 – коэффициенты:

$$K_2 = 0,2 + 0,02 \lg W_C, \quad K_3 = \frac{GT + 10^4}{10^4}, \quad N_1 - \text{число пассажиров на судне в ка-}$$

ютах с числом мест менее 8; N_2 – число остальных пассажиров.

$$\text{При } L < 24 \text{ м } GT = K_1(W_1 + W_2), \quad V_1 = LBDC_b,$$

где $C_B = 0,68$ – коэффициент общей полноты; W_2 – общий объем всех закрытых пространств выше верхней палубы; K_1 – постоянный коэффициент равный 0,25.

Чистая или нетто вместимость малых судов вычисляется по формуле $NT = 0,3GT$.

2.4.2. Уравнение объёмов, составляющих кубатуру судна

Уравнение объёмов, составляющих кубатуру судна, написанное нами выше в общем виде

$$W = \sum_{i=1}^n W_i \quad (2.72)$$

предполагает необходимость расчленения, общей кубатуры на отдельные элементы, аналогично тому, как это мы делали в отношении водоизмещения судна.

Количество отдельных помещений, предназначенных для тех или других целей, доходит на некоторых современных судах до нескольких сот, особенно на таких судах, как крупные промысловые базы и трансатлантические крупные пассажирские суда.

В связи с тем, что в уравнении объёмов, составляющих кубатуру судна, аналогично уравнению весов, составляющих водоизмещение, мы должны выразить каждый из объёмов в функции от неизвестных величин Δ и W и ряда заданных величин, целесообразно ограничиться, возможно, более укрупненной разбивкой объёмов.

С этой целью необходимо объёмы отдельных помещений объединить в некоторые группы или блоки помещений по признаку их назначения, а также их местонахождения в основном корпусе судна или в его надстройках.

В стадии аналитического решения задачи значительно проще и удобнее иметь дело в качестве обобщенных неизвестных не с полной кубатурой судна W , которая складывается из кубатуры основного корпуса W_k и кубатуры надстроек W_s , а только с кубатурой основного корпуса W_k . В связи с этим академик В. Л. Поздунин ввел понятие *коэффициента развития надстроек*

$s = \frac{W_s}{W_k}$, величину которого следует рассматривать в нашей задаче в качестве одного из параметров, характеризующих архитектурный тип судна

со стороны развития его надстроек. Перепишем уравнение (2.72) в следующем виде

$$W = W_k + W_s = (1 + s)W_k. \quad (2.73)$$

В отношении классификации различных судовых помещений в настоящее время не имеется каких-либо регламентированных норм, а само расположение отдельных помещений в основном корпусе судна или в его надстройках представляются на усмотрение проектанта. Тем не менее, если обратиться к отдельным типам судов, можно отметить, что практикой, в основном, установлена номенклатура помещений, располагаемых как в основном корпусе, так и в надстройках.

Заимствуя эту практику из подобранных судов-прототипов и объединяя объемы отдельных помещений в блоки по признаку их назначения, можно расчленить кубатуру судна на сравнительно небольшое число групп.

Для составления интересующего нас уравнения объемов необходимо, очевидно, поступить таким же образом, как это мы делали для составления уравнения весов, то есть выразить величины объемов отдельных блоков помещений посредством тех или других нормативов, в зависимости от неизвестных нам величин Δ , W_k или W и N , а также в зависимости от известных в задаче величин, приняв, за исключением некоторых случаев, простейшие линейные зависимости.

Для составления уравнения объемов, составляющих кубатуру судна, эти нормативы могут быть выработаны, например, на основе следующих соображений.

1. Объем грузовых или рефрижераторных трюмов является пропорциональным чистой грузоподъемности судна P_z и удельной погрузочной кубатуре груза W_z , а объемы, необходимые для размещения промыслового и технологического оборудования, будут определяться в зависимости от типа принятых машин и запроектированного технологического процесса на

судне. Очевидно, объемы помещений этих блоков могут считаться в уравнении объемов независимыми известными величинами, так как все данные, необходимые для определения этих объемов, обычно даются в техническом задании на проектирование судна.

2. Объем помещений управления, связи и поисковой аппаратуры может считаться для данного типа судна пропорциональным его водоизмещению.

3. Объем помещений главных механизмов и котлов на больших судах можно считать пропорциональным мощности главных механизмов.

4. Объем помещений вспомогательных механизмов и разных устройств в первом приближении может считаться пропорциональным водоизмещению судна.

5. Объем цистерн для топлива и котельной воды можно полагать пропорциональным мощности главных механизмов и заданной дальности плавания.

6. Объем жилищно-бытовых, санитарных и хозяйственных помещений можно считать пропорциональным числу экипажа и производственных рабочих, которое обычно задано или может быть приближенно определено по прототипу.

7. Объем цистерн питьевой и мытьевой воды, а также провизионных помещений можно принять пропорционально числу экипажа и производственных рабочих, дальности плавания и нормам суточного расхода.

8. Объем цистерн и отсеков разного назначения в первом приближении можно принять пропорциональным водоизмещению.

Пользуясь указанными зависимостями, уравнение объемов можно привести к следующему общему виду

$$W = (1 + s)W_k = A_1\Delta + B_1\Delta^{2/3} + W_0, \quad (2.74)$$

где s – коэффициент развития надстроек, A_1 и B_1 – численные коэффициенты, составленные из отдельных объемных нормативов, W_0 – сумма независимых объемов помещений.

Решая уравнение (2.74) совместно с уравнением весов, составляющих водоизмещение, получим численные значения интересующих нас величин Δ , W_k и W .

Варьируя величину коэффициента развития надстроек s , мы получим, очевидно, несколько пар значений Δ и W , соответствующих выбранным значениям коэффициента s .

Однако следует помнить, что уравнение объемов, составляющих кубатуру судна, в каждом частном случае дает возможность определить величину потребной кубатуры только с точки зрения вместимости.

Как было указано выше, это уравнение не учитывает тех ограничений, которые налагаются на величину кубатуры любого судна условиями запаса плавучести и остойчивости.

Поэтому во избежание получения абсурдных решений при использовании уравнения объемов, необходимо отдельные объемные нормативы, входящие в это уравнение, получать путем тщательной обработки данных соответствующих судов-прототипов.

В частности, под нормативом удельной погрузочной кубатуры груза W_z следует понимать частное от деления вместимости трюмов брутто на фактический вес помещенных в них грузов при морской укладке.

При разработке объемных нормативов для отдельных типов судов следует также обращать внимание на объемы различных пустых отсеков, наличие которых, как правило, диктуется соображениями получения достаточного запаса плавучести.

Независимо от определения реальной величины кубатуры проектируемого судна, в каждом частном случае желательно определять и величину

той минимальной кубатуры судна, которая является потребной, исходя только из условия обеспечения вместимости судна. Определение величины указанной кубатуры, которую можно находить из уравнения (2.74), считая водоизмещение известным из уравнения весов, позволяет нам в каждом частном случае критически подойти к разрешению вопроса о рациональном типе судна со стороны развития его надстроек и о целесообразных размерах судна. Практическое применение изложенного приема совместного определения обобщенных неизвестных величин Δ , W_K и W встречает затруднение формального порядка в том отношении, что в настоящее время объемные нормативы являются еще недостаточно изученными, хотя вышеизложенная методика была впервые опубликована академиком В. Л. Поздуниным еще в 1938 году. Кроме того, необходимо учитывать, что разработка чертежей общего расположения проектируемого судна, являясь обязательной, *по существу является графическим решением уравнения объемов.*

2.4.3. Разработка эскизов общего расположения проектируемого судна

Разработку эскизов общего расположения судовых помещений целесообразно выполнять сразу же после определения водоизмещения проектируемого судна в первом приближении, используя при этом метод геометрического подобия. Аналогично уравнению весов судна в этом случае мы определяем высвободившиеся помещения от "снимаемых весов", а также определяем потребность в размещении помещений относящихся к "добавляемым весам". Таким образом, проектанту становится ясным, какие помещения испытывают дефицит по сравнению с судном-прототипом и, наоборот, какие помещения имеют избыточную кубатуру и площади.

После второго приближения, когда определены главные размерения и коэффициенты полноты проектируемого судна, производятся уточнения в разрабатываемых эскизах, как по размерениям, так и по предваритель-

ным обводам корпуса проектируемого судна, используя при этом метод аффинных преобразований.

Третье приближение выполняется после разработки теоретического чертежа проектируемого судна, когда появляется возможность полностью учесть обводы корпуса судна и выполнить чертежи общего расположения с заданной точностью.

Рассмотрим классификацию судовых помещений, предложенную А.В. Бронниковым в работе [6].

На каждом морском судне предусматриваются помещения следующих трех категорий: помещения экипажа, служебные помещения, специальные помещения.

Рассмотрим номенклатуру судовых помещений крупных морских судов неограниченного плавания.

1) Помещения экипажа, предназначены для создания соответствующих бытовых условий экипажу судна. В их состав входят следующие помещения:

жилые помещения – каюты комсостава и команды;

общественные – кают-компания и салоны комсостава, столовая, курительные, помещения для занятий, спортивные помещения, плавательные бассейны и др.;

санитарно-гигиенические – умывальные, бани, душевые, ванны, туалеты;

хозяйственные и бытовые – камбуз, хлебопекарня, посудомоечная, буфетные, провизионные кладовые, рефрижераторные камеры, цистерны пресной воды, прачечная, сушилка, кладовые чистого и грязного белья, помещения для хранения и сушки спецодежды, раздевалки и др.;

медицинские – стационар(лазарет), изолятор, амбулатория, кладовые медицинского оборудования и лекарств, стерилизационная;

2) Служебные помещения, необходимые для эксплуатации судна, как плавучего сооружения. К ним относятся помещения:

главных механизмов – машинные и котельные отделения;

вспомогательных механизмов – электростанция, насосные отделения, помещения вспомогательных котлов, лебедочные, помещения якорных механизмов, подруливающих устройств, румпельное помещение и т.п.;

навигационных запасов – цистерны топлива, смазочного масла, питательной воды для котлов;

навигационные – рулевая и штурманская рубки, радиорубка, помещения гирокомпаса, помещение эхолота и прочие;

общесудовые и хозяйственные – фонарная, малярная, плотницкая, шкиперская, тросовая и другие кладовые;

балластные цистерны;

цепные ящики;

коффердамы;

туннель гребного вала.

3) Специальные помещения, необходимые для выполнения судном его основного назначения.

Для *транспортных* (грузовых и пассажирских) отнесем:

грузовые помещения – трюмы, твиндеки, диптанки;

пассажирские помещения – жилые, общественные, санитарно-гигиенические, хозяйственно-бытовые и медицинские.

Для *рыбопромысловых судов и плавбаз* отнесем:

помещения для промыслового и технологического оборудования;

грузовые помещения – специальные трюмы, диптанки.

Для *стационарных и плавучих морских буровых установок* отнесем:

помещения для бурового и специального оборудования;

грузовые помещения – для хранения судовых и специальных запасов.

Для научно-исследовательских судов отнесем:

помещения для специального оборудования;

помещения для научно-исследовательских лабораторий;

грузовые помещения для хранения судовых и специальных запасов.

2.4.4. Размещение и оборудование жилых и общественных помещений

Экипаж каждого морского судна, возглавляемый капитаном, состоит из командного состава и судовой команды и определяется согласно размерам судна и его целевому назначению. Комплексная автоматизация управления технологическими процессами, а именно процессами судовождения, грузовыми и швартовными операциями и особенно работой судовой энергетической установки позволила значительно сократить численность экипажа. Так, высокоавтоматизированные танкеры дедвейтом 80 – 90 тыс.т, а также контейнеровозы на 1600 и более стандартных контейнеров имеют уже уменьшенные экипажи численностью 20 – 21 человек, а на норвежских грузовых судах до 18 человек [7]. Уменьшение численности экипажа позволяет существенно уменьшить количество помещений для экипажа, а также и размеры надстроек, что приводит к снижению стоимости постройки судов и снижению затрат на содержание судна. Уменьшение численности экипажа позволяет проектировщикам, кроме того, существенно улучшить условия размещения и жизни экипажа на морском судне.

Помещения современного морского судна должны иметь удобную планировку и по возможности простую современную приятную отделку, удобное оборудование, что позволяет создать хорошие условия обитаемости. Требования к жилым и общественным помещениям экипажа и пассажиров – их размерам, размещению и составу – регламентируются Правилами Морского Регистра [54] и Государственными Санитарными Правилами для морских судов Украины [24].

Санитарные Правила разделяют все морские суда на четыре категории:

категория I – суда неограниченного района плавания, а также суда с длительностью рейса более 5 суток;

категория II – суда с длительностью рейса свыше 24 ч, но не более 5 суток;

категория III – суда с длительностью рейса не более 24 ч;

категория IV – суда с длительностью рейса не более 8 ч.

Суда III и IV категорий оборудуют штатными местами для сидения пассажиров в закрытых помещениях. Минимальная норма площади для внекаютного пассажира 1,2 м².

В Санитарных правилах приводятся данные о минимально допустимых площадях, кубатуре и оборудованию помещений; перечислены помещения судна, предназначенные для общественных нужд и служебных целей, а также указаны места, где жизни или здоровью людей может быть причинен вред и где, в связи с этим, запрещается устройство жилых помещений.

Для размещения экипажа и пассажиров запрещается использовать следующие помещения:

– где отсутствуют естественное освещение, вентиляция и отопление, предназначенные для механизмов и грузов;

– общественные, медицинские, хозяйственные, бытовые, пищевого блока, кладовых и т. п.;

– предназначенные для управления судном;

– высота которых менее установленной Санитарными правилами; недостаточно изолированные от воздействия тепла, холода, проникания воды, испарений, запахов и газов, выделяемых работающими двигателями, котельными и холодильными установками, грузами, топливом, судовыми запасами, подсланевыми водами и т.п.;

– примыкающие к кладовым и трюмам, предназначенным для хранения хладагентов (аммиака, фреона и пр.), опасных и ядовитых материалов или грузов, а также расположенных рядом со станциями пожаротушения, которые используют опасные для здоровья и жизни людей химические вещества;

– внутри которых имеются не огражденные шахтами люки; не отделенные от малярной или фонарной газонепроницаемыми переборками, палубами или сообщающиеся с ними через общие помещения;

– имеющие непосредственный выход через двери или лазы в машинно-котельные и насосные отделения, помещения пищевого блока, отсека для топлива, отсека для фекальных цистерн, коффердамы и т. п.;

– все другие помещения, признанные органами и учреждениями санэпидслужбы или Морским Регистром не пригодными для размещения экипажа и пассажиров.

Не разрешается также устраивать жилые каюты для экипажа и пассажиров над топливными цистернами, не отделив их горизонтальным коффердамом высотой не менее 0,6 м, и рядом с топливными цистернами, если не установлен вертикальный коффердам шириной в одну шпацию.

Выходы из жилых помещений экипажа и пассажиров осуществляются через жилые коридоры и вестибюли. Каждый жилой отсек должен иметь два выхода.

Выходы на открытые палубы следует предохранять от попадания воды, для чего устраивают особые тамбуры и капы, предусматривая достаточное естественное и искусственное освещение.

Материалы, применяемые для отделки и теплоизоляции, должны быть безвредными для людей, стойкими к вибрации, не выделять запахов и газов, не благоприятствовать развитию насекомых, плесени и появлению грызунов.

Металлические палубы в жилых помещениях покрывают настилом.

Требования Санитарных правил можно подразделить на две самостоятельные группы:

I. Требования, обеспечивающие необходимые удобства для пассажиров и экипажа на судах и регламентирующие площади и объемы судовых помещений, их оборудование.

II. Требования к судам, обеспечивающие условия нормальной обитаемости людей и регламентирующие нормы освещенности, шумности, тепловой режим (отопление и вентиляцию), водоснабжение, нормы вибрации, качки и пр.

Кроме того, на нефтеналивных судах не допускается размещение жилых помещений ниже верхней палубы. Эти помещения должны быть расположены вне района грузовых отсеков и не над насосными отделениями или коффердамами.

Перечисленные требования и ограничения гарантируют определенные бытовые удобства и безопасность членам судового экипажа и пассажирам и исключают возможность размещения кают в темных, шумных или опасных частях корпуса судна.

2.4.5. Помещения для экипажа

Жилые помещения для экипажа, т. е. комсостава, команды, производственных рабочих и обслуживающего персонала, включая медицинских работников, директора ресторана со штатом, а также пассажирской службы, выполняют, руководствуясь следующими рекомендациями: жилые каюты должны быть одноместными, допустимы двухместные каюты с койками в один ярус.

На малых судах, а также на крупных рыбопромысловых судах в трех- и четырехместных каютах допускается двухъярусное расположение коек.

На малых судах с экипажем, работающим по бригадному методу, рекомендуется устраивать только дежурные помещения для отдыха и приема

пищи подвахтенной смены. Эти помещения оборудуют диванами по числу подвахтенных, шкафами, столом и другим инвентарем.

Во всех жилых каютах экипажа полезная кубатура воздуха (без объема шкафов) должна быть не менее 6 м^3 на одного человека. В каютах капитана и старшего механика, а на больших судах и других членов комсостава рекомендуется, кроме койки, устанавливать диваны для отдыха длиной не менее 1,7 м; их располагают перпендикулярно койкам.

В жилых каютах устанавливают индивидуальные шкафы (высота – 1,75 м и, ширина – 0,4 м, глубина – 0,5 м), столы, стулья или складные сиденья, а также умывальники, вешалки и пр.

При проектировании кают комсостава судна необходимо учитывать следующие минимальные рекомендации:

- устанавливать койки размером 2000x900 мм, а перпендикулярно положению коек – диваны;
- если каюты капитана и старшего механика состоят из двух помещений (блок-каюта) – кабинета и спальни, то вход в спальню делают из кабинета, а вход в санблок из спальни;
- если эти каюты состоят из одного помещения, то перед диваном следует предусмотреть стол, а умывальник устраивают в нише;
- письменный стол желательно устанавливать так, чтобы он освещался слева, у стола следует поставить стул для посетителей;
- кабинет рекомендуется оборудовать шкафами для книг и верхнего платья.

На рисунке 2.10 представлены каюты комсостава на крупнотоннажном судне [7].

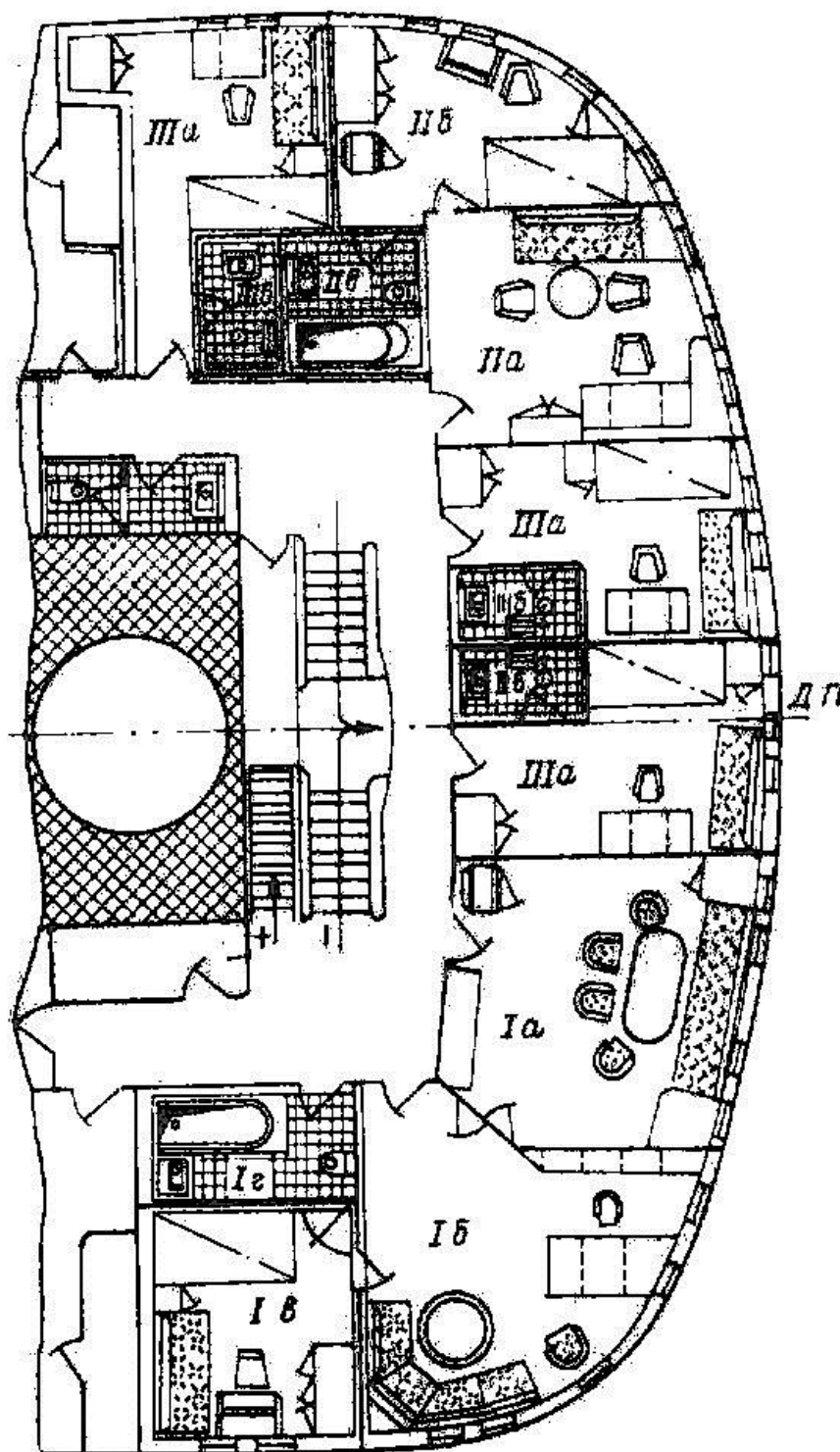


Рисунок 2.10 – Каюты комсостава на крупнотоннажном судне:
 блок-каюта капитана – I а – салон, I б – кабинет, I в – спальня, I г – санузел;
 блок-каюта старшего помощника – II а кабинет, II б – спальня,
 II в – санузел; каюта члена комсостава – III а жилая каюта, III б – санузел

При проектировании кают команды принимаются во внимание следующие соображения:

- разделяют команды по специальностям, помещения специалистов стараются располагать поближе к месту работы;
- каюты комсостава отделяют от кают команды;
- однозначные каюты объединяют в блок, создавая типовые каюты с одинаковым оборудованием;
- осуществляют максимальную типизацию и унификацию жилых помещений;
- создают комфорт в жилых помещениях экипажа за счет рациональной планировки кают и их оборудования.

На рисунке 2.11 показаны различные типовые каюты.

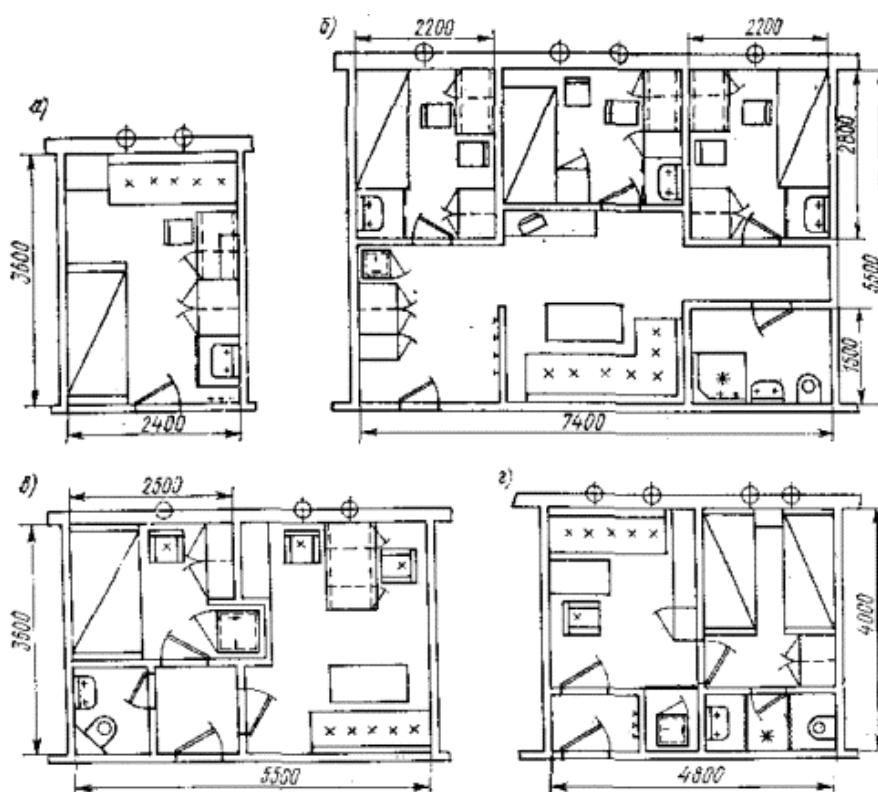


Рисунок 2.11 – Типовые каюты:

- а) одноместная каюта члена команды $8,4 \text{ м}^2$, б) блок-каюта команды,
 в) блок-каюта старшего помощника капитана $19,8 \text{ м}^2$,
 г) двухместная каюта команды $13,1 \text{ м}^2$

При размещении оборудования в каютах необходимо учитывать удобство пользования им в условиях качки.

На рисунке 2.12 изображена столовая команды на ледоколе "Адмирал Макаров". Если экипаж судна не превышает пяти человек, допускается объединять столовую с камбузом.

На пассажирских судах камбуз (кухню) для экипажа устраивают отдельно от пассажиров. Камбузы на судах всех типов оборудуют плитами, разделочными и раздаточными столами ит.д. Его рекомендуется размещать рядом со столовой или вблизи неё. Кроме камбуза необходимо предусмотреть посудомоечную.

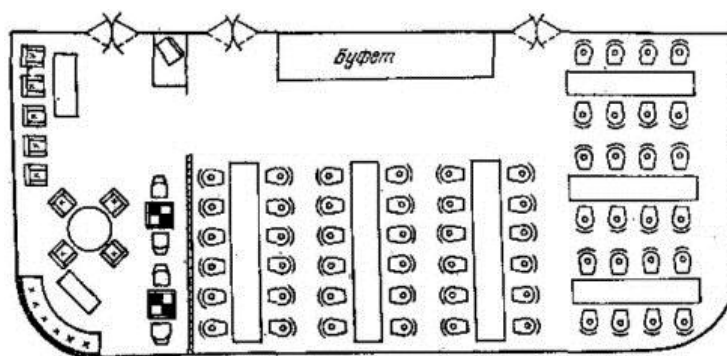


Рисунок 2.12 – Столовая команды на ледоколе "Адмирал Макаров"

На всех судах с количеством экипажа более 20 чел. следует оборудовать комнату отдыха, площадь которой должна быть не менее половины площади столовой для экипажа. На судах с числом экипажа менее 20 чел. допускается объединять комнату отдыха со столовой экипажа, при этом площадь столовой увеличивают.

Для хранения грязного и чистого судового белья экипажа необходимо оборудовать специальные помещения: кладовые, шкафы и лари вне жилых помещений. Кроме этого, для хранения спецодежды следует оборудовать специальное помещение или устроить металлические шкафы вне жилых помещений и пищевого блока. Шкафы должны иметь отделения; высота отделения соответствует высоте помещения, глубина равна 0,35 м, а ширина – 0,3 м.

2.4.6. Помещения для пассажиров

Главная задача при проектировании пассажирских судов преследует цель создания пассажирам наилучших условий обитания и отдыха на судне в течение рейса при обязательном обеспечении норм безопасности плавания. На рисунке 2.13 представлены основные направления и первоочередные объекты внимания при проектировании пассажирских судов [10].



Рисунок 2.13 – Основные направления и первоочередные объекты внимания при проектировании пассажирских судов

Санитарные правила [24] требуют в пассажирских каютах обеспечивать естественное освещение, что возможно при их размещении по бортам судна [7]. Однако на судах шириной более 16 м разрешается отступать от этого требования и располагать часть пассажирских кают не по бортам, а в глубине отсеков. В практике мирового судостроения при ширине судов более 17 – 18 м каюты также располагают в несколько (до пяти) рядов по бортам.

Наиболее комфортабельными каютами на пассажирских судах являются каюты "люкс", как правило, двухместные, имеющие в составе несколько помещений: гостиная, спальня, санузел.

Размещать пассажиров на судах разрешается только в специально отведенных и оборудованных для этого помещениях, а в летнее время – на открытых палубах с местами для сидения, имеющих леерные ограждения и тенты.

При проектировании крупных пассажирских судов круизного плавания особенно трудно предусмотреть и разместить общественные помещения для пассажиров. Эти помещения служат для организации и проведения различных культурно-массовых мероприятий, коллективного отдыха и питания экипажа и пассажиров.

К проходным помещениям относят коридоры, тамбуры, вестибюли, фойе, закрытые прогулочные палубы [6].

На судах I и II категорий для прогулки пассажиров на открытых палубах следует предусматривать свободную площадь из расчета не менее $0,5 \text{ м}^2$ на одного человека. Кроме того, на пассажирских, грузопассажирских и круизных судах этих категорий на верхней открытой (тентовой) палубе рекомендуется устраивать солярии для пассажиров. Прогулочные палубы и солярии необходимо оборудовать соответствующей мебелью: плетеными стульями, шезлонгами, лежаками.

2.4.7. Кладовые для хранения провизии

На судах I и II категорий рекомендуется устраивать в кладовых холодильники с разной температурой охлаждения: для мяса, рыбы, масла и жиров, сухих продуктов, для овощей и фруктов – и кладовую расходных продуктов (суточный запас). На судах с числом пассажиров не более 250 чел. допускается устройство двух холодильных кладовых: одна – для мяса и жиров, вторая – для рыбы и рыбных продуктов. При наличии свободного места на судне предусматривают кладовую для овощей и фруктов.

На грузовых, буксирных и других судах при недостатке свободного места допускается оборудование одной холодильной (рефрижераторной) камеры. Размеры этой камеры должны быть достаточными для отдельно-

го хранения мяса и мясопродуктов, рыбы и рыбопродуктов, а также готовых мясных, рыбных и молочных продуктов, для чего в общей кладовой устраивают специальные стеллажи или полки. Для сухих продуктов оборудуют лари необходимой емкости.

Холодильные камеры размещают в непосредственной близости от камбуза (в смежных помещениях или трюмах); с камбузом они связаны специальными проходами, трапами, лифтами. На судах длиной менее 25 м и несамоходных допускается хранение скоропортящихся продуктов в холодильниках.

2.4.8. Помещения медицинского назначения

На пассажирских судах I и II категорий и на грузовых и буксирных судах с числом экипажа более 25 чел. необходимо оборудовать медицинские помещения, руководствуясь следующими нормами:

на судах I категории с числом экипажа и пассажиров 100–200 чел. устраивают санитарную каюту площадью не менее 5 м²;

на судах I категории с общим числом экипажа и пассажиров 200–600 чел. необходимо оборудовать амбулаторию площадью 6 м² и такой же площади изолятор;

на судах II категории с общим числом экипажа и пассажиров 100 чел. и более оборудуют санитарную каюту площадью 5 м².

2.4.9. Санитарно-гигиенические помещения для экипажа и пассажиров

Туалетные. На всех судах для экипажа и пассажиров должны быть оборудованы туалетные, т.е. помещения, объединяющие уборную с умывальной. Туалетные устраивают как для общего пользования, когда туалет расположен в коридоре и состоит из тамбура и кабины, так и в каютах для экипажа и пассажиров (санузлы или санкабины).

Если число экипажа не превышает 15 чел., то устанавливают один унитаз, а на каждые последующие 15 чел. – дополнительно по одному унитазу. На 30 пассажиров, занимающих спальные места, устраивают один унитаз, а на каждые последующие 30 чел. – дополнительно по одному унитазу. На 40 пассажиров, занимающих места для сидения, оборудуют один унитаз, а на каждые последующие 40 чел. – дополнительно по одному унитазу.

На судах IV категории, работающих на внутригородских линиях, допускается сокращать число унитазов до 50% по сравнению с их числом на судах III и IV категорий.

Умывальные оборудуют отдельно для мужчин и женщин. На пассажирских судах умывальные для экипажа и пассажиров устраивают отдельно.

Число умывальников для экипажа: на пассажирских судах – один кран на 15 чел., на всех остальных судах – один кран на 10 чел., при этом из расчета исключают членов экипажа, пользующихся умывальниками в своих каютах. Число умывальников на судах I и II категорий: для пассажиров, занимающих мягкие и жесткие места, в каютах которых не установлены умывальники, – один кран не более чем на 25 чел., но не менее двух кранов.

Для внекаютных пассажиров – один кран не более чем на 25 чел. из числа первых 50 пассажиров, а затем на каждые 50 пассажиров дополнительно по одному крану. На судах III категории на 25 чел. – один кран и дополнительно по одному крану на каждые последующие 50 чел. На судах IV категории, если количество пассажиров не превышает 50, – один кран и на каждые последующие 50 чел. дополнительно по одному крану.

Душевые, ванны, бани. На всех судах для членов экипажа и пассажиров необходимо устраивать душевые и бани. Для членов экипажа одно место в бане или одну душевую сетку предусматривают на 10 чел.

При проектировании душевых для пассажиров соблюдают следующие требования.

На судах I категории – один душ на 40 пассажиров, занимающих мягкие и жесткие места; на судах II категории – один душ на 75 пассажиров, занимающих мягкие и жесткие места; на судах I категории – один душ на 75 пассажиров, занимающих места для сидения.

Ширина и глубина душевой кабины должны быть не менее 0,9х0,9 м, площадь палубы раздевальной – не менее 0,8 м². Наименьшая площадь всей индивидуальной душевой должна быть не менее 1,6 м².

В душевых предусматривают полочку для мыла и мочалок.

Раздевальную при душевой (и бане) оборудуют: скамьями, крючками для одежды, настенным зеркалом и полками для белья и туалетных принадлежностей.

Бани оборудуют кранами холодной и горячей воды, скамьями, полкой для тазов, полкой для туалетных принадлежностей. Ванны, как правило, предусматривают только для старшего комсостава и пассажиров и устанавливают их в санузлах при каютах.

На больших пассажирских и грузовых судах I категории может быть предусмотрен плавательный бассейн. Вода в бассейне должна быть проточной и систематически дезинфицироваться, а в случае необходимости и подогреваться. Стены и пол бассейна покрывают метлахскими или кафельными плитками белого цвета. Для входа в бассейн и выхода из него устраивают трапы с поручнями.

На всех судах, где число членов экипажа достигает 10 чел. и более, устраивают помещение для стирки белья – прачечную.

Санитарные Правила содержат ряд дополнительных требований, обеспечивающих нормальные условия обитаемости людей на судне. Эти требования относятся к водоснабжению, фановой и сточной системам, освещению, отоплению, вентиляции и кондиционированию воздуха, а также нормам допустимых уровней шума. Правила указывают, что каждое

судно должно быть обеспечено в достаточном количестве питьевой и мытьевой водой и водой для технических целей.

Питьевой водой обязательно снабжают: камбузы, заготовочные, буфеты, столовые, рестораны, посудомойные, все умывальники, кипятильники и медицинские каюты, каюты гигиены женщин.

Питьевую воду следует хранить в специальных цистернах, но допускается использовать для этой цели отсеки корпуса (кроме двойного дна). В этом случае стенки отсеков не должны соприкасаться с забортной водой и граничить с емкостями для топлива, масла, фекалиями. Дно цистерн должно иметь уклон в сторону крана. Емкости с питьевой водой не разрешается устанавливать в машинно-котельном отделении или в отсеках с фекалиями.

2.4.10. Вестибюли, коридоры, трапы

Вестибюли. Количество вестибюлей зависит от назначения и размеров судна. На грузовых судах и небольших пассажирских их можно вообще не устраивать. На больших пассажирских судах вестибюли образуются пролетами судна. При посадке пассажир попадает в вестибюль, по внутренней отделке и общему виду которого составляет мнение о судне. Поэтому необходимо уделять большое внимание расположению и архитектурному оформлению вестибюлей.

Обычно главный вестибюль объединяют с шахтой, где располагают парадные трапы, ведущие на другие палубы. От вестибюля расходятся коридоры жилых помещений. На крупных судах в вестибюлях устраивают почтовые отделения, киоски, парикмахерскую, бюро администратора.

Коридоры следует проектировать без поворотов. Коридоры бывают главные и вспомогательные. Наименьшая ширина коридоров, м: в пассажирских помещениях 0,9–1,2 (главных) и 0,8–0,9 (второстепенных), в помещениях команды соответственно 0,8–1,0 и 0,8. На судах, испытывающих качку, по переборкам коридоров устанавливают штормовые поручни.

Трапы. По назначению трапы подразделяют на трюмные и грузовые, жилых, машинных, котельных помещений и, наконец, служебные. На судах пользуются также забортными трапами, служебными для спуска и подъема людей с воды на борт (например, со шлюпки на судно).

Трапы жилых помещений бывают парадными (с площадок-вестибюлей) или обычными. Кроме того, в некоторых жилых помещениях, машинных отделениях устраивают специальные аварийные трапы или скоб-трапы, обеспечивающие выход людей из этих помещений на открытые площадки во время аварий (например, пожара).

Все судовые трапы, как правило, оборудуют поручнями, а открытые трапы – леерными ограждениями. В соответствии с конструктивным выполнением трапы бывают: прямые, ломаные или с поворотом, чаще всего с поворотом на 180° , причем трапы могут быть с площадками или с забежными ступенями, криволинейные – витые, круглые и в исключительных случаях винтовые.

Уклон трапов к горизонту не должен превышать 60° , однако в пассажирских помещениях трапы выполняют с уклоном к горизонту не более 50° , а главное пологие трапы больших пассажирских судов – не более 45° .

Между помещениями, расположенными на разных палубах, должно быть не менее двух трапов. Если число пассажиров в пассажирских помещениях, размещенных в корпусе, превышает 20 чел., то в противоположных концах помещения должно быть оборудовано два трапа. Причем один из них (запасный) обязательно должен выходить на открытую палубу вне надстройки. Если это требование осуществить невозможно, то трап выводят в изолированную выгородку в надстройке, обеспечивающую при пожаре в надстройке безопасный выход на открытую часть палубы. Если число пассажиров 20–50 чел., не более, разрешается запасный трап выполнять как скоб-трап. Люк трапа обносят низким комингсом, который не должен мешать свободному проходу людей.

2.5. Контрольные вопросы:

1. Методы определения основных элементов проектируемого судна в первом приближении.
2. Уравнение мощности и его разновидности.
3. Определение мощности энергетической установки по двухкомпонентным формулам в функции Δ и v_s .
4. Энерговооруженность морских судов.
5. Определение удельных затрат энергии на движение морских судов.
6. Уравнение весов и его разновидности.
7. Нагрузка судна. Общие понятия.
8. Уравнение весов в функции водоизмещения судна и его формы.
9. Коэффициент утилизации водоизмещения.
10. Квадратное и кубическое уравнения весов.
11. Дифференциальное уравнение весов.
12. Особенности определения водоизмещения малых судов.
13. Уравнение объемов, составляющих кубатуру судна.
14. Разработка эскизов общего расположения проектируемого судна.
15. Полная теоретическая вместимость судна.
16. Принципы размещения и оборудования жилых и общественных помещений.

2.6. Основные термины и понятия

Мощность главных двигателей	Кубатура судна
Уравнение объемов	Уравнение мощности
Сопротивление трения	Буксировочная мощность
Энерговооруженность морских судов	Уравнение весов
Нагрузка судна	Запас водоизмещения
Дифференциальное уравнение весов	Вместимость судна

РАЗДЕЛ III. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРЕНИЙ ПРОЕКТИРУЕМОГО СУДНА

3.1. Определение главных размерений проектируемого судна заданного водоизмещения

Полученное в первом приближении водоизмещение проектируемого судна Δ позволяет нам поставить задачу определения главных размерений. В ряде случаев главные размерения проектируемого судна могут быть грубо определены в предположении, что обводы корпуса проектируемого судна сохраняются геометрически подобными обводам корпуса судна-прототипа, тогда

$$\begin{aligned} L &= \lambda L_0 \\ B &= \lambda B_0 \\ D &= \lambda D_0 \\ d &= \lambda d_0 \end{aligned} \quad (3.1)$$

где L, B, D, d – главные размерения проектируемого судна, м; L_0, B_0, D_0, d_0 – главные размерения судна-прототипа, м; $\lambda = \sqrt[3]{\Delta/\Delta_0}$ – линейный масштаб пересчета по водоизмещению при геометрическом подобии.

Необходимо отметить, что в этом случае все коэффициенты полноты C_b, C_m, C_w остаются неизменными.

Полученные главные размерения проектируемого судна позволяют перейти проектанту к разработке эскизов общего расположения, т. е. графической проработке уравнения объемов проектируемого судна. При этом проектант получает дополнительную и весьма ценную информацию о проектируемом судне.

Предварительный эскиз общего расположения проектируемого судна значительно расширяет представление проектанта о поставленной задаче, позволяет выявить наиболее узкие места по кубатуре, метражу и другим

показателям для ряда помещений, а также проверить правильность определения кубатуры судна по уравнению объемов.

В практике проектирования судов широко используются способы построения теоретического чертежа проектируемого судна путем перестроения теоретического чертежа судна-прототипа. Наиболее широкое распространение получил способ аффинных преобразований перестроения теоретического чертежа судна-прототипа. При этом изменяются только главные размерения L, B, D, d , а коэффициенты полноты C_b, C_m, C_w проектируемого судна и отношение D/d остаются неизменными [50].

В общем случае при изменении L, B , и d в теоретическом чертеже ординаты «у» изменяются пропорционально B/B_0 , расстояние между ватерлиниями – пропорционально d/d_0 и расстояние между теоретическими шпангоутами – пропорционально L/L_0 . Коэффициенты пересчета примут вид

$$\begin{aligned} l &= \frac{L}{L_0} \\ b &= \frac{B}{B_0} \\ t &= \frac{D}{D_0} = \frac{d}{d_0} \end{aligned} \quad . \quad (3.2)$$

При изменении L, B и d связующее уравнение примет вид

$$\frac{\nabla}{\nabla_0} = \frac{LBd}{L_0 B_0 d_0}, \quad (3.3)$$

где ∇, ∇_0 – объемное водоизмещение проектируемого судна и судна-прототипа; L, B, D, d – главные размерения проектируемого судна, м; L_0, B_0, D_0, d_0 – главные размерения судна-прототипа, м.

При изменении только каждого из L, B , и d будем иметь

$$\begin{aligned}
 L &= \frac{\nabla}{\nabla_0} L_0 \\
 B &= \frac{\nabla}{\nabla_0} B_0 . \\
 d &= \frac{\nabla}{\nabla_0} d_0
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

Во многих случаях даже на ранней стадии проектирования уже становится ясно, что соотношения главных размерений проектируемого судна должны быть изменены по сравнению с судном-прототипом. В этом случае главные размерения проектируемого судна могут быть определены по следующим формулам

$$\begin{aligned}
 L &= \Delta^{\frac{1}{3}} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{\gamma} \cdot \left(\frac{L}{B}\right)^2 \cdot \frac{B}{d} \cdot \frac{1}{C_b}}, \\
 B &= \Delta^{\frac{1}{3}} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{\gamma} \cdot \left(\frac{L}{B}\right)^{-1} \cdot \frac{B}{d} \cdot \frac{1}{C_b}}, \\
 d &= \Delta^{\frac{1}{3}} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{\gamma} \cdot \left(\frac{L}{B}\right)^{-1} \cdot \left(\frac{B}{d}\right)^{-2} \cdot \frac{1}{C_b}},
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

где Δ – водоизмещение проектируемого судна, т, $\frac{L}{B}, \frac{B}{d}$ – соотношение главных размещений проектируемого судна, C_b – коэффициент полноты проектируемого судна, γ – вес 1 м^3 морской воды.

Необходимо отметить, что зависимости (3.5) легко выводятся из уравнения плавучести

$$\Delta = \gamma L B d C_b. \tag{3.6}$$

Следовательно, при определении главных размерений проектируемого судна, необходимо производить достаточно глубокое обоснование выбора соотношений главных размерений и коэффициентов полноты проектируемого судна [52].

3.2. Дифференциальное уравнение И.Г. Бубнова

3.2.1. Дифференциальное уравнение плавучести

Полный дифференциал водоизмещения проектируемого судна получим из уравнения плавучести (3.6), а именно

$$\begin{aligned} d\Delta &= \frac{\partial \Delta}{\partial L} dL + \frac{\partial \Delta}{\partial B} dB + \frac{\partial \Delta}{\partial d} dd + \frac{\partial \Delta}{\partial C_b} dC_b = \\ &= \frac{\Delta}{L} dL + \frac{\Delta}{B} dB + \frac{\Delta}{d} dd + \frac{\Delta}{C_b} dC_b \end{aligned} \quad (3.7)$$

где $\frac{\Delta}{L}$, $\frac{\Delta}{B}$, $\frac{\Delta}{d}$, $\frac{\Delta}{C_b}$ – частные производные, определяемые по данным судна-прототипа.

3.2.2. Дифференциальное уравнение весов

В укрупненных статьях нагрузки (2.53) заменим значение водоизмещения Δ уравнением плавучести (3.6), а именно

$$\left. \begin{aligned} P_{\Delta} &= A(\gamma \cdot L \cdot B \cdot d \cdot C_b) \\ P_m &= p_m \frac{(\gamma \cdot L \cdot B \cdot d \cdot C_b)^{2/3} v_s^3}{C} \\ P_m &= p_m \frac{(\gamma \cdot L \cdot B \cdot d \cdot C_b)^{2/3} v_s^3}{C} \cdot \tau \\ P_0 &= P_z + P_{o\phi} + P_{mc} \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

Полный дифференциал водоизмещения, соответственно определится

$$\begin{aligned} d\Delta &= \sum \frac{\partial \Delta}{\partial L} dL + \sum \frac{\partial \Delta}{\partial B} dB + \sum \frac{\partial \Delta}{\partial d} dd + \sum \frac{\partial \Delta}{\partial C_b} dC_b + \\ &+ \sum \frac{\partial \Delta}{\partial v_s} dv_s + \sum \frac{\partial \Delta}{\partial \tau} d\tau + dP_0 \end{aligned} \quad (3.9)$$

3.2.3. Уравнения И.Г. Бубнова

Соблюдая закон Архимеда, потребуем, чтобы приращение водоизмещения проектируемого судна из уравнения (3.9) равнялось приращению сил поддержания по уравнению плавучести, а именно

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\Delta}{L} - \sum \frac{\partial P_i}{\partial L}\right)dL + \left(\frac{\Delta}{B} - \sum \frac{\partial P_i}{\partial B}\right)dB + \left(\frac{\Delta}{d} - \sum \frac{\partial P_i}{\partial d}\right)dd + \\ & + \left(\frac{\Delta}{C_b} - \sum \frac{\partial P_i}{\partial C_b}\right)dC_b = \sum \frac{\partial P_i}{\partial v_s} dv_s + \sum \frac{\partial P_i}{\partial \tau} d\tau + dP_0 \end{aligned} \quad (3.10)$$

Полученное уравнение И. Г. Бубнова имеет три искомых величины dL , dB , dd , а коэффициентом общей полноты при этом обычно задаются.

Таким образом, для совместного решения необходимо принять два дополнительных уравнения, например

$$\begin{aligned} \frac{L_0 + dL}{B_0 + dB} &= a \\ \frac{B_0 + dB}{d_0 + dd} &= b \end{aligned} \quad (3.11)$$

Отметим, при наличии близкого судна прототипа, отношение $\frac{L}{B}$ и $\frac{B}{d}$ принимаются по данным судна-прототипа.

3.3. Выбор соотношений главных размерений и коэффициентов полноты корпуса проектируемого судна

Рассмотренные методы определения главных размерений проектируемого судна требуют предварительного определения либо всех соотношений главных размерений и коэффициентов полноты корпуса, либо отдельных соотношений главных размерений при сохранении коэффициентов полноты корпуса, как у судна-прототипа. Необходимо отметить, что соотношения главных размерений и коэффициентов полноты корпуса судна на практике оказывают существенное влияние на все мореходные качества проектируемого судна, что, в конечном счете, необходимо учитывать при их выборе.

3.3.1. Выбор относительной длины проектируемого судна

Относительная длина или заостренность судна обычно определяется как

$$l = \frac{L_{\text{квл}}}{\sqrt[3]{\nabla}}, \quad (3.12)$$

где $L_{\text{квл}}$ – длина судна по КВЛ, м; ∇ – объёмное водоизмещение, м³.

В.Л. Позднюнин [51], обследовав 300 гражданских судов различных типов водоизмещением от 1600 до 4200 т и скоростью хода от 8 до 20 уз, получил формулу, характеризующую зависимость средней статистической длины от скорости судна

$$l = \frac{L_{\text{квл}}}{\sqrt[3]{\nabla}} = 7,2 \left(\frac{v_s}{v_s + 2} \right), \quad (3.13)$$

где v_s – скорость хода судна, уз.

Исследуя эту формулу, сотрудники Вагенинского бассейна (Голландия) отметили, что коэффициент $C = 7,2$ должен расти вместе с ростом расчетной скорости и составлять:

$C = 7,17$ – для одновинтовых транспортных судов ($v_s = 11 - 16,5$ уз.);

$C = 7,32$ – для двухвинтовых транспортных судов ($v_s = 15,5 - 18,5$ уз.);

$C = 7,93$ – для пассажирских лайнеров ($v_s > 20$ уз.).

Л.М. Ногид [46] предложил формулу вида

$$l = C_n v_s^{1/3}, \quad (3.14)$$

где $C_n = 2,16$ – для скоростей $v_s < 16$ уз; $C_n = 2,33$ – для скоростей $v_s \leq 24$ уз.

В работе В.В. Ашика [1] предложены следующие статистические зависимости:

для пассажирских судов

$$l = 4,26 + 0,075 v_s \pm 0,5, \quad (3.15)$$

для сухогрузных судов

$$l = 4,47 + 0,06v_s \pm 0,3. \quad (3.16)$$

Из уравнения плавучести (3.6) можно получить относительную длину судна в виде

$$l = \sqrt[3]{\left(\frac{L}{B}\right)^2 \cdot \frac{B}{d} \cdot \frac{1}{C_b}}. \quad (3.17)$$

Из формулы (3.17) следует, что наибольшее влияние на относительную длину судна l оказывает отношение $\frac{L}{B}$.

Формулу (3.17) можно представить также в виде

$$l = \sqrt[3]{\left(\frac{L}{B}\right)^2 \cdot \frac{B}{D} \cdot \frac{D}{d} \cdot \frac{1}{C_b}} \quad (3.18)$$

показывающую более сложную связь относительной длины судна с соотношениями главных размерений.

3.3.2. Выбор соотношений главных размерений проектируемого судна

Из формулы (3.18) следует, что отношение $\frac{L}{B}$ можно выразить, как

$$\frac{L}{B} = \sqrt{\frac{l^3 \cdot C_b}{B/d}}. \quad (3.19)$$

Таким образом, на выбор отношения $\frac{L}{B}$ определяющее влияние оказывает относительная длина судна и, следовательно, при выбранной относительной длине судна отношение $\frac{L}{B}$ можно определить практически точно, если взять отношение $\frac{B}{D}$ и C_b по близкому судну-прототипу.

В таблице 3.1 приведены данные отношений $\frac{L}{B}$ для различных типов судов. Отметим, нижние значения отношения $\frac{L}{B}$ принадлежат, как правило, малым тихоходным судам, а верхние значения отношения $\frac{L}{B}$ принимаются для среднескоростных и быстроходных судов.

Таблица 3.1 – Соотношения главных размерений и коэффициенты полноты судов различных типов

Элементы	Соотношения главных размерений			Коэффициенты полноты			
	$\frac{L}{B}$	$\frac{B}{D}$	$\frac{D}{d}$	C_{wp}	C_m	C_b	ϕ
Универсальные сухоргузные	6,00-8,00	2,20-3,20	1,05-1,67	0,70-0,80	0,93-0,985	0,85-0,75	0,68-0,80
Суда для перевозки массовых грузов	6,00-7,50	2,15-2,80	1,05-1,60	0,70-0,86	0,92-0,985	0,70-0,83	0,60-0,80
Нефтеналивные суда	5,50-7,50	2,20-3,50	1,20-2,00	0,70-0,86	0,92-0,99	0,62-0,82	0,60-0,80
Контейнеровозы	6,50-9,00	2,50-3,70	1,60-2,20	0,65-0,80	0,90-0,98	0,56-0,79	0,60-0,70
Накатные суда	6,20-8,00	2,50-3,70	1,60-2,50	0,65-0,80	0,90-0,98	0,56-0,75	0,60-0,80
Рефрижераторы	6,60-8,80	2,50-2,90	1,45-1,90	0,70-0,80	0,95-0,98	0,60-0,75	0,60-0,80

Отношение ширины судна к осадке $\frac{B}{d}$ оказывает сравнительно небольшое влияние на сопротивление судна, его грузовместимость и на соотношение весов, входящих в нагрузку судна, но особенно сильно влияет на остойчивость судна как в неповрежденном, так и в аварийном состоянии.

Л.М. Ногид для определения отношения $\frac{B}{d}$ предложил формулы

а) для универсальных сухогрузных судов традиционного типа

$$\frac{B}{d} = 4,20 \cdot L^{-1/8}, \quad (3.20)$$

б) для крупных пассажирских судов

$$\frac{B}{d} = 5,90 \cdot L^{-1/8} \pm (0,2 - 0,5), \quad (3.21)$$

в) для танкеров при длине судна $L \leq 215$ м

$$\frac{B}{d} = 0,533 \cdot \frac{L}{100} + 1,50. \quad (3.22)$$

Увеличение длины танкеров сверх указанного предела не сказывается на отношении $\frac{B}{d}$, которое в среднем сохраняет постоянное значение

$\frac{B}{d} = 2,56$. В таблице 3.1 приведены данные отношений данных $\frac{B}{d}$ для различных типов судов.

Отношение высоты борта судна к осадке $\frac{D}{d}$ — оказывает сильное влияние на вместимость судна, остойчивость, непотопляемость судна.

А.В. Бронников [6] для определения отношения $\frac{D}{d}$ сухогрузных судов рекомендует формулы:

а) суда длиной более 100 м

$$\frac{D}{d} = 0,63 + 0,41\mu \pm 0,03, \quad (3.23)$$

б) суда длиной менее 100 м

$$\frac{D}{d} = 0,56 + 0,40\mu \pm 0,03, \quad (3.24)$$

где μ — удельная грузовместимость судна, м³/т.

Полученное отношение $\frac{D}{d}$ должно отвечать условию [41]

$$\left(\frac{D}{d}\right)_{\min} \leq \left(\frac{D}{d}\right)_{\text{проекта}} \leq \left(\frac{D}{d}\right)_{\max} \quad (3.25)$$

где $\left(\frac{D}{d}\right)_{\min}$ – определяется требованиями минимальной высоты надводного борта по Правилам о грузовой марке; $\left(\frac{D}{d}\right)_{\max}$ – определяется требованиями начальной остойчивости.

В таблице 3.1 приведены данные соотношения $\frac{D}{d}$ для различных типов судов.

3.3.3. Выбор коэффициентов полноты корпуса проектируемого судна

Формула А.В. Бронникова для одно винтовых транспортных судов при $Fr = 0,19 - 0,25$

$$C_b = 1,07 - 1,68 \cdot Fr, \quad (3.26)$$

$Fr = 0,25 - 0,29$

$$C_b = 1,21 - 2,30 \cdot Fr \quad (3.27)$$

Формула Л.М. Ногида для крупных тихоходных судов с цилиндрическим носом

$$C_b = 1,19 - 2,08 \cdot Fr. \quad (3.28)$$

Формула А.В. Бронникова для пассажирских судов при $Fr = 0,25 - 0,35$

$$C_b = 0,77 - 0,78 \cdot Fr. \quad (3.29)$$

Формула СИ. Логачева для танкеров

$$C_b = 1,105 - 1,68 \cdot Fr. \quad (3.30)$$

Коэффициент полноты мидельшпангоута C_m по формуле В.В. Аши-ка имеет вид

$$C_m = (1,00 - 1,03)C_b^{0.5}. \quad (3.31)$$

Л.М. Ногид предложил значение $C_m = 0,992 = const$ если $C_b \geq 0,8$ для крупных судов.

Связь между коэффициентами полноты была установлена Норманом для судов 60-х годов XIX вв.

$$\left(\frac{C_m C_{wp}}{C_b} \right)_{cp} \cong 1,15. \quad (3.32)$$

В.В. Ашик получил для быстроходных судов 1910 – 1940 гг. постройки

$$\left(\frac{C_m C_{wp}}{C_b} \right)_{cp} \cong 1,16 \quad (3.33)$$

при значениях коэффициентов продольной φ и вертикальной полноты χ

$$\varphi = \frac{C_b}{C_m}, \quad \chi = \frac{C_b}{C_{wp}} \quad (3.34)$$

имеем

$$C_{wp} \approx 1,16 \cdot \frac{C_b}{C_m} \cong 1,16\varphi, \quad C_m \approx 1,16 \cdot \frac{C_b}{C_{wp}} \cong 1,16\chi. \quad (3.35)$$

Отметим, что рассмотренные приближенные формулы выбора соотношений главных размерений и коэффициентов полноты корпуса проектируемого судна предлагались для судов не имеющих бульба в носовой оконечности корпуса судна. Что же касается влияния бульба в носовой оконечности корпуса судна на мореходные качества судна то, к сожалению в виду сложности задачи, наиболее надежный путь – это подбор близких судов-прототипов с бульбом, доказавшим при эксплуатации положительное влияние на ходкость судна.

3.4. Влияние главных размерений и коэффициентов полноты корпуса судна на характеристики начальной остойчивости

3.4.1. Поперечная метацентрическая высота, как характеристика начальной остойчивости судна

Метацентрическая формула остойчивости определяет восстанавливающий момент судна при малых наклонениях в виде

$$M_{\theta} = \Delta \cdot h \cdot \sin(\theta) \approx \Delta \cdot h \cdot \theta, \quad (3.36)$$

где Δ – водоизмещение проектируемого судна, кН; h – начальная поперечная метацентрическая высота, м; θ – угол крена, град.

Условие малости θ было сформулировано еще Л.П. Эйлером, считавшим для парусных судов большие наклонения нереальными. Для большинства судов, имеющих относительно высокий надводный борт, это положение действительно и сегодня. Однако для низкобортных судов и, особенно, для малых морских судов, оценка их остойчивости только по метацентрической формуле недостаточна, и может привести к катастрофе при эксплуатации такого судна [1].

Угол крена θ , при этом, определяется

$$\theta = \frac{M_{кр}}{M_{\theta}} \approx \frac{M_{кр}}{\Delta \cdot h}, \quad (3.37)$$

где $M_{кр}$ – кренящий момент от действия внешних сил на судно, кНм; θ – угол крена, рад.

Отсюда следует, что угол крена θ обратно пропорционален начальной поперечной метацентрической высоте, т. е. чем больше значение имеет метацентрическая высота, тем меньше будет угол крена θ .

Однако, при этом необходимо учитывать, что период собственных поперечных колебаний судна непосредственно связан с начальной метацентрической высотой зависимостью, предложенной У. Ховгардом, вида

$$\tau = \frac{c \cdot B}{\sqrt{h}}, \quad (3.38)$$

где B – ширина судна, м; c – коэффициент, определяемый по данным близких судов-прототипов.

Метацентрическую высоту для больших судов обычно связывают с шириной проектируемого судна, как

$$\bar{h} = \frac{h}{B}, \quad (3.39)$$

где $\bar{h}$ – относительная метацентрическая высота.

Для грузовых судов, не имеющих навигационных ограничений, относительную метацентрическую высоту рекомендуется принимать в пределах $\bar{h} = 0,03 + 0,05$. Для больших судов принимают $\bar{h} \geq 0,10$ [1].

Метацентрическая высота грузовых судов в состоянии порожнем возрастает, достигая для судов среднего тоннажа 1,5...2,0 м. Отметим, в балластном пробеге при большой начальной метацентрической высоте поведение грузовых судов на взволнованном море ухудшается. При ширине судна $B < 15$ м. Л. М. Ногид рекомендовал $\bar{h} = 0,7...0,8$ м. Для промысловых судов. Л.М. Ногид также рекомендовал метацентрическую высоту в пределах $h = 0,7...0,8$ м [45]. Правила морского Регистра судоходства, а также ИМО, требуют проверки остойчивости судов при больших углах крена. Однако, при этом необходимо учитывать, что результаты такой проверки для судов шириной более 10м носят обычно чисто проверочный характер. Для судов с $B \leq 10$ м **проверка остойчивости по Правилам морского Регистра судоходства должна производиться самым внимательным образом**, так как может привести к необходимости изменения размеров судна из-за недостаточности остойчивости проектируемого судна.

3.4.2. Уравнение начальной остойчивости в алгебраической форме

Выразим начальную поперечную метацентрическую высоту

$$h = z_c + r - z_g, \quad (3.40)$$

где z_c – возвышение центра величины над основной линией, м; r – поперечный малый метацентрический радиус, м; z_g – возвышение центра тяжести над основной линией, м.

Л.П. Эйлер (в 70-е г. XVIII в) предложил формулу для определения аппликаты центра величины в виде

$$z_c = \frac{C_{wp}}{C_{wp} + C_b} \cdot d, \quad (3.41)$$

Вывод формулы (3.41) по схеме Л.П. Эйлера представлен в таблице 3.2.

В общем случае, для судовых обводов корпуса проектируемого судна, формулу (3.46) можно уточнить в виде

$$z_c = k_c \cdot \frac{C_{wp}}{C_{wp} + C_b} \cdot d, \quad (3.42)$$

где k_c – коэффициент, определяемый по данным близких судов- прототипов.

Отметим, как правило, $k_c > 1$. Для быстроходных судов ($Fr > 0,28$) может быть принято $k_c = 1,017 \pm 0,023$ [1].

При использовании статистических данных по близким судам- прототипам формулы (3.42) удобнее представить в виде

$$z_c = a_1 \cdot d, \quad (3.43)$$

где a_1 – определяется по статистическим данным, либо близким судам- прототипам.

Таблица 3.2 – Вывод формулы (3.41) по схеме Л.П. Эйлера

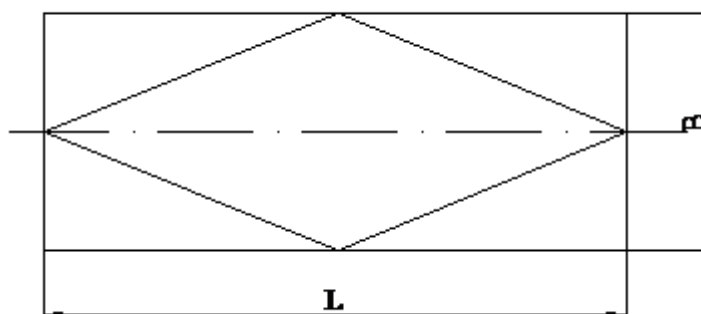
Форма подводной части	Коэффициент вертикальной полноты χ	Относительное возвышение центра величины над основной линией $\frac{z_c}{d}$	Относительное возвышение центра величины над основной линией в функции χ
Вертикальный борт, плоское днище (прямоугольные шпангоуты)	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{z_c}{d} = \frac{1}{1+1} = \frac{1}{1+\chi}$
Треугольные шпангоуты с вершиной на ОЛ (вершина обращена вниз)	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{z_c}{d} = \frac{1}{1+1/2} = \frac{1}{1+\chi}$
Пирамида с вершиной в ОЛ (вершина обращена вниз)	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{z_c}{d} = \frac{1}{1+1/3} = \frac{1}{1+\chi}$

Поперечный (малый) метацентрический радиус равен

$$r = \frac{I_x}{\nabla}, \quad (3.44)$$

где I_x – момент инерции площади КВЛ относительно главной продольной оси ХХ.

Л.П. Эйлер рассмотрел две граничные ватерлинии – прямоугольную и ромбовидную (см. рисунок 3.1).

Рисунок 3.1 – Прямоугольная ($C_{wp} = 1,0$) и ромбовидная ($C_{wp} = 0,5$)

ватерлинии

Для прямоугольной ватерлинии момент инерции $I_x = \frac{L \cdot B^3}{12}$, а для ромбовидной ватерлинии $I_x = \frac{L \cdot B^3}{48}$. Соответственно, поперечный метацентрический радиус можно определить

$$r = \frac{I_x}{V} = \frac{C_{wp}^2}{12 \cdot C_b} \cdot \frac{B^2}{d}. \quad (3.45)$$

Для судовых обводов корпуса проектируемого судна формулу (3.45) можно уточнить

$$r = k_r \frac{C_{wp}^2}{12 \cdot C_b} \cdot \frac{B^2}{d}, \quad (3.46)$$

где k_r – коэффициент, определяемый по данным близких судов-прототипов.

Для S-образных ватерлиний значение $k_r = 1,06 \pm 0,05$, для выпуклых (без перегиба) $k_r = 1,03 \pm 0,05$ [1].

При использовании статистических данных формулу (3.46) удобнее представить в виде

$$r = a_2 \cdot \frac{B^2}{d}, \quad (3.47)$$

где a_2 – определяется по статистическим данным, либо близким судам-прототипам.

Отметим, продольный (большой) метацентрический радиус R можно определить аналогичным образом, через момент инерции I_y относительно оси Y . Выражение для R примет вид

$$R = k_R \frac{C_{wp}^2}{12 \cdot C_b} \cdot \frac{L^2}{d}, \quad (3.48)$$

где k_R – значительно меньше, чем k_r . Для судов с выпуклыми ватерлиниями $k_R = 0,90 \pm 0,03$ [1].

Что же касается аппликаты центра тяжести проектируемого судна, то для его определения примем простейшую зависимость, вида

$$z_g = \zeta \cdot D, \quad (3.49)$$

где ζ – коэффициент, определяемый по данным близких судов-прототипов.

Попытки создания более сложных зависимостей обычно не увенчиваются успехом, так как z_g зависит не только от обводов корпуса судна, но также от общего расположения, а поэтому получаемые формулы имеют обычно невысокую точность.

Таким образом, формулу (3.40) можно представить в функции главных размерений и коэффициентов полноты корпуса проектируемого судна в виде

$$h = k_c \cdot \frac{C_{wp}}{C_{wp} + C_b} \cdot d + k_r \frac{C_{wp}^2}{12 \cdot C_b} \cdot \frac{B^2}{d} - \zeta \cdot D. \quad (3.50)$$

При наличии близких судов-прототипов формулу (3.50) удобнее использовать в виде

$$h = a_1 \cdot d + a_2 \cdot \frac{B^2}{d} - \zeta \cdot D, \quad (3.51)$$

где a_1 , a_2 и ζ – коэффициенты, определяемые по данным близких судов-прототипов.

Из формулы (3.51) следует, что наибольшее влияние на начальную остойчивость судна оказывает ширина судна. Что же касается высоты борта, следует иметь ввиду, что коэффициент пропорциональности ζ , с увеличением размеров судна, как правило, уменьшается, отсюда следует, что судно-прототип должен быть наиболее близким.

Влияние осадки судна на остойчивость, удобнее рассматривать через аппликату метацентра в виде

$$z_m = a_1 \cdot d + a_2 \cdot \frac{B^2}{d}, \quad (3.52)$$

Из формулы (3.52) следует, что первая производная $\frac{\partial z_m}{\partial d}$ равна в районе минимума

$$a_1 - a_2 \cdot \frac{B^2}{d^2} = 0$$

откуда

$$\left(\frac{B}{d}\right)_{кр} = \sqrt{a_1/a_2} \text{ или } d_{кр} = B \cdot \sqrt{a_2/a_1}. \quad (3.53)$$

На рисунке 3.2 приведен график $z_m = f(d)$

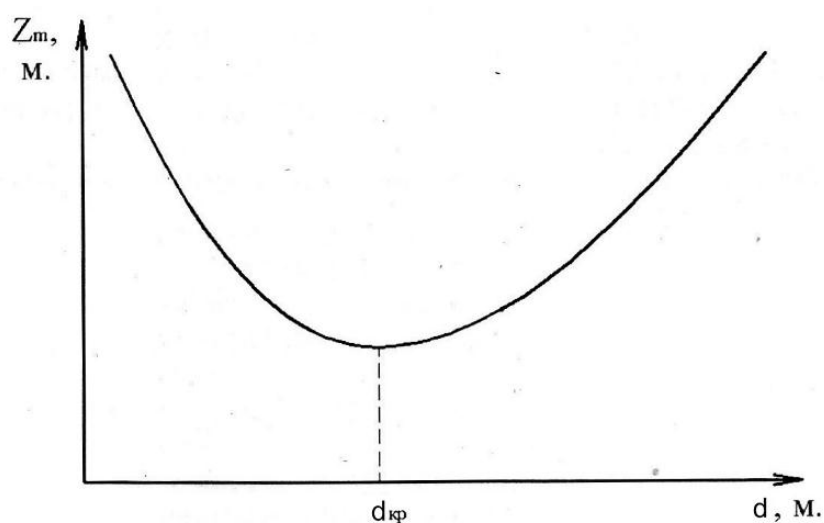


Рисунок 3.2 – Зависимость z_m от осадки судна

Определять значение $d_{кр}$ целесообразно по кривым теоретических элементов, в следующем виде (см. рисунок 3.3).

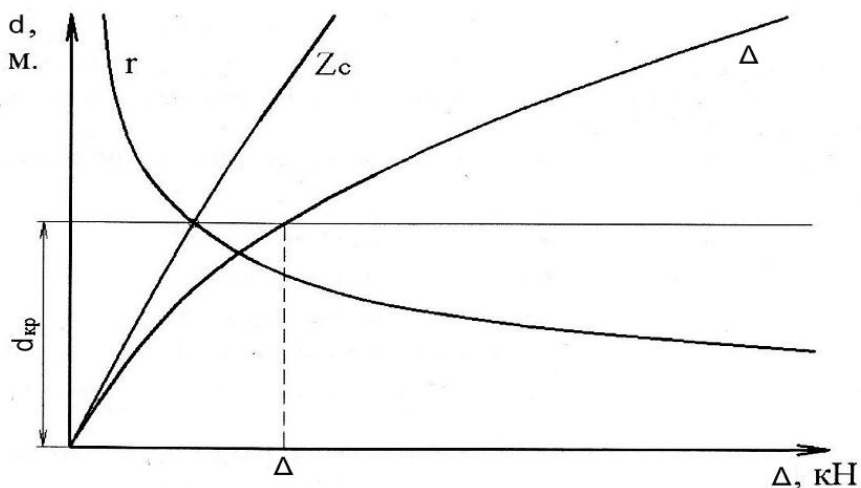


Рисунок 3.3 – Определение критической осадки $d_{кр}$,
отвечающей $h_{\min}$ или $z_m = \min$

Влияние коэффициентов формы обводов корпуса судна на остойчивость можно проследить по формуле (3.50). Коэффициент полноты конструктивной ватерлинии C_{wp} , при своём увеличении, положительно влияет на увеличение начальной остойчивости, однако следует помнить, что полные ватерлиний, особенно в носовой оконечности, могут существенно влиять на увеличение сопротивления воды проектируемому судну. Уменьшение коэффициента общей полноты C_b , как правило, повышает начальную остойчивость проектируемого судна, но приводит при этом к увеличению главных размерений судна.

3.4.3. Уравнение начальной остойчивости в дифференциальной форме

Из уравнения начальной остойчивости (3.50) следует, что $h = f(B, D, d, C_b, C_{wp}, \zeta)$, есть сложная функция шести независимых переменных величин, соответственно полный дифференциал поперечной метacentрической высоты можно представить в следующем виде

$$dh = \frac{\partial h}{\partial B} dB + \frac{\partial h}{\partial D} dD + \frac{\partial h}{\partial d} dd + \frac{\partial h}{\partial C_{wp}} dC_{wp} + \frac{\partial h}{\partial C_b} dC_b + \frac{\partial h}{\partial \zeta} d\zeta. \quad (3.54)$$

Уравнение (3.54) может быть использовано для совместного решения с уравнением И.Г.Бубнова.

3.4.4. Уравнение начальной остойчивости при аффинных преобразованиях теоретического чертежа

Напомним, что

$$\begin{aligned} L &= lL_0 & C_b &= const \\ B &= bB_0 & C_{wp} &= const \\ d &= td_0 & C_m &= const \\ D &= tD_0 & \frac{D}{d} &= const \end{aligned}$$

и рассматривая $h = a_1 \cdot d + a_2 \cdot \frac{B^2}{d} - \zeta \cdot D$, отсюда $h = f(B, D, d)$.

Используем масштабы пересчета с прототипа на проект, тогда

$$h = ta_1 d_0 + a_2 \cdot \frac{b^2 B^2 C_m^2}{td_0} - \zeta \cdot tD_0, \quad (3.55)$$

Необходимо отметить, что формула (3.55) *при аффинных преобразованиях даёт точный результат.*

3.5. Влияние главных размерений и коэффициентов полноты корпуса на характеристики диаграммы статической остойчивости проектируемого судна

3.5.1. Оценка остойчивости при проектировании морских судов

Оценка остойчивости морских судов производится по международным правилам изложенным в кодексе остойчивости неповреждённых судов всех типов, на которые распространяются документы ИМО. Кодекс содержит критерии остойчивости неповреждённых судов нижеследующих

типов и других морских транспортных средств длиной 24 м и более, если не указано иное: грузовые суда, грузовые суда, перевозящие лесные палубные грузы, грузовые суда, перевозящие зерно насыпью, пассажирские суда, рыболовные суда, суда специального назначения, морские суда обеспечения, подвижные буровые установки, понтоны, суда с динамическими принципами поддержания, контейнерные суда.

Критерии подразделяются на общие, распространяющиеся на все суда, и дополнительные относящиеся к судам различных типов и назначения.

Общие критерии сводятся к следующему:

1. Критерии, предъявляемые к диаграмме статической остойчивости должна, которая должна удовлетворять, с учётом поправок на свободные поверхности, следующим требованиям:

- площадь диаграммы статической остойчивости до угла крена $\theta = 30^\circ$ должна быть не менее 0,055 м.рад и не менее 0,09 м.рад. до $\theta = 40^\circ$, или угла заливания θ_f , если он менее 40° ;
- площадь диаграммы между углами крена 30° и 40° или между углами 30° и θ_f , если он менее 40° , должна быть не менее 0,03 м.рад.;
- максимальное плечё статической остойчивости $l_{\theta \max}$ должно составлять по меньшей мере 0,20 м. при угле крена $\theta \geq 30^\circ$;
- максимум диаграммы $l_{\theta \max}$ должны быть при угле крена желатель-но превышающем 30° , но не менее 25° ;
- предел положительной статической остойчивости (закат диаграммы) должен быть не менее 60° ;
- начальная метацентрическая высота должна составлять не менее 0,15 м;
- безопасный предел остойчивости судна должен быть обеспечен для всех наиболее тяжелых случаев нагрузки, с учётом погрузочных операций,

балластировки и возможного обледенения судна, а также выполнения общих рекомендаций по эксплуатации судна.

2. Критерии сильного ветра и бортовой качки (критерий погоды). Способность судна противостоять совместному воздействию бокового ветра и бортовой качки должна быть показана для каждого типового варианта нагрузки, как показано на рисунке 3.4, с учетом следующего:

- судно подвергается воздействию постоянного ветра, приложенного перпендикулярно диаметральной плоскости судна, с плечом кренящего момента (l_{w1});

- предполагается, что судно при воздействии волн испытывает бортовую качку и наклоняется от результирующего угла равновесия (θ_0) до угла крена при бортовой качке (θ_1) в наветренную сторону. Следует обратить внимание на воздействие постоянного ветра, для того чтобы избежать чрезмерных результирующих углов крена (при этом угол крена θ_0 не должен превышать 16° или 80% от угла, при котором кромка палубы погружается в воду, в зависимости от того, какой угол меньше);

- судно подвергается воздействию шквального ветра, в результате чего образуется плечё кренящего момента при шквальном ветре (l_{w2});

- при упомянутых обстоятельствах площадь "b" должна быть равна или больше площади "a";

- должно приниматься в расчёт влияние свободной поверхности жидких грузов при типовых вариантах нагрузки, а также обледенение судна.

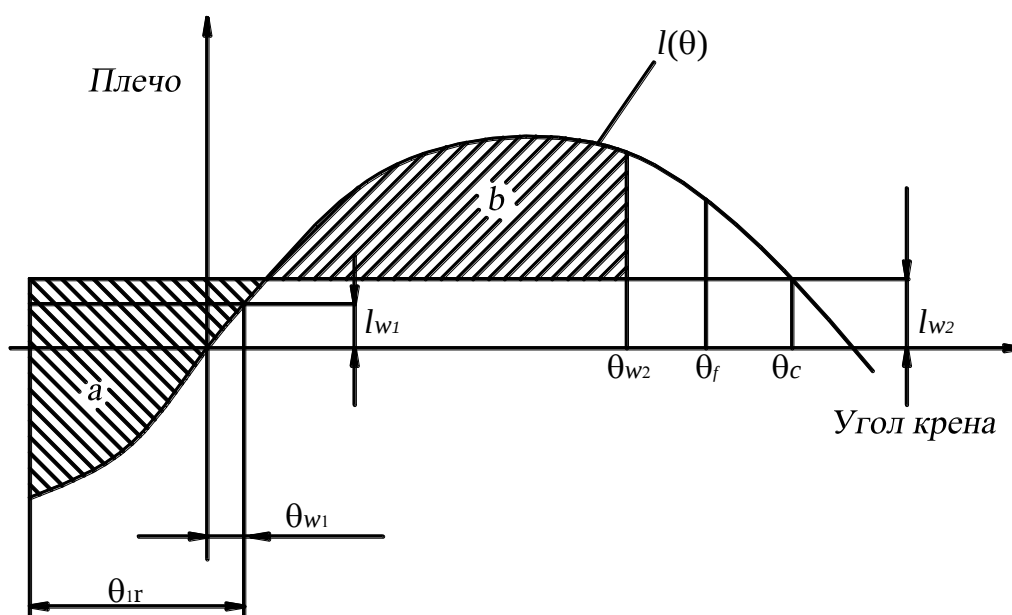


Рисунок 3.4 – Воздействие сильного ветра и бортовой качки
(критерий погоды)

θ_0 – угол крена от действия постоянного ветра; θ_1 – угол крена в наветренную сторону от действия волн; θ_2 – угол заливания крена θ_f или 50° , или θ_c , в зависимости от того, какой угол меньше

Таким образом, критерии погоды $K_{ИМО}$ определяется по формуле:

$$K_{ИМО} = \frac{\text{площадь "b"}}{\text{площадь "a"}} \geq 1. \quad (3.56)$$

В главе 4 Кодекса приводятся специальные критерии для судов некоторых типов, а именно: грузовые суда, перевозящие лесные палубные грузы, рыболовные суда, суда специального назначения, грузовые суда, перевозящие зерно насыпью, морские суда обеспечения, подвижные буровые установки, понтоны, суда с динамическими принципами поддержания, контейнерные суда длиной более 100 м.

Для выполнения практических расчётов в Кодексе ИМО приводится подробная методика и даются конкретные данные, необходимые для определения соответствующих критериев остойчивости проектируемых судов.

Правила Регистра судоходства Украины по остойчивости разработаны в соответствии с вышеизложенном Кодексе ИМО. Причём, некоторые критерии в Правилах Регистра Украины изложены более жёстко по сравнению с кодексом ИМО. Так, например, максимальное плечё диаграммы статической остойчивости $l_{\theta_{\max}}$ должно быть не менее 0,25 м. для судов длиной $L \leq 80$ м., т.е. более жесткие чем Кодекс ИМО, и 0,20 м. для судов длиной $L \geq 105$ м. при угле крена $\theta \geq 30^\circ$. Для промежуточных значений L величина, плеча определяется линейной интерполяцией.

Критерии остойчивости по Правилам Регистра судоходства Украины можно подразделить на две группы:

к первой группе критериев отнесем требования Правил по определению **нормированных внешних сил** и моментов, воздействующих на морское судно в процессе эксплуатации;

ко второй группе критериев отнесем требования Правил **по определению предельно допустимого момента**, с учётом качки судна на волнении.

Таким образом, если первая группа критериев определяет **нормированные внешние силы и моменты**, обязательные для исполнения при проектировании судов, то предельно допустимый момент, при заданном расчетном водоизмещении Δ , определяется **главным образом диаграммами статической либо динамической остойчивости**, находящихся в руках проектантов и следовательно, **имеется возможность их совершенствования**.

Отметим, что диаграмма статической остойчивости морских судов нормируется практически всеми классификационными обществами мира, на основании Международного Кодекса ИМО по остойчивости неповреждённых судов.

Для предварительной оценки выразим предельно допустимую диаграмму статической остойчивости по требованиям Правил Регистра судоходства Украины синусойдой вида [57]:

$$l_{\theta} = 0,25 \cdot \sin(3\theta), \quad (3.57)$$

где 0,25 – максимальное плечё статической остойчивости, отвечающее углу крена $\theta^{\circ} = 30^{\circ}$ при длине $L \leq 80$ м.

В таблице 3.3 приведено сравнение значений плеч статической и динамической остойчивости, полученных по формуле (3.57) со значениями указанными в Правилах Регистра судоходства Украины. Сравнение показывает, что предлагаемая диаграмма статической остойчивости с определённым запасом выражает минимальные требования, предъявляемые к остойчивости морских судов $L \leq 80$ м. по Правилам Регистра судоходства Украины.

Таблица 3.3 – Сравнительные характеристики предельно допустимой диаграммы статической остойчивости малого судна

Параметры	θ°	Правила Регистра	$l_{\theta} = 0,25 \cdot \sin(3\theta)$
l_{θ}	при $\theta = 30^{\circ}$	$l_{\theta} \geq 0,250$	0,250
	при $\theta = 60^{\circ}$	$l_{\theta} \geq 0,000$	0,000
d_{30} , м. рад.	при $\theta = 30^{\circ}$	$d_{30} \geq 0,055$	0,081
d_{40} , м. рад.	при $\theta = 40^{\circ}$	$d_{40} \geq 0,090$	0,122
$d_{40} - d_{30} \geq 0,03$	-	$d_{40-30} \geq 0,030$	0,041
h_0	при $\theta = 0^{\circ}$	0,500	0,750

Кодекс остойчивости неповреждённых судов всех типов, на которые распространяются документы ИМО, предъявляет менее жесткие требования к диаграмме статической остойчивости судна, которую приближенно можно выразить выражением

$$l_{\theta} = 0,20 \cdot \sin(3\theta), \quad (3.58)$$

где 0,20 – максимальное плечо статической остойчивости, отвечающее углу крена $\theta \geq 30^{\circ}$.

В таблице 3.4 приведено сравнение значений плеч статической и динамической остойчивости полученных по формуле (3.58) со значениями указанными в кодексе ИМО. Сравнение показывает, что предлагаемая минимальная диаграмма статической остойчивости с некоторым запасом отвечает минимальным требованиям кодекса ИМО. Графическое изображение минимальных диаграмм статической остойчивости, по требованиям Правил Регистра судоходства Украины и Кодекса ИМО, приведены на рисунке 3.5.

Таблица 3.4 – Требования ИМО к диаграмме статической остойчивости судна

Параметры	θ°	Правила Регистра	$l_{\theta} = 0,20 \cdot \sin(3\theta)$
l_{θ}	при $\theta = 30^{\circ}$	$l_{\theta} \geq 0,200$	0,200
	при $\theta = 60^{\circ}$	$l_{\theta} \geq 0,000$	0,000
$d_{30}, \text{м. рад.}$	при $\theta = 30^{\circ}$	$d_{30} \geq 0,055$	0,065
$d_{40}, \text{м. рад.}$	при $\theta = 40^{\circ}$	$d_{40} \geq 0,090$	0,097
$d_{40} - d_{30} \geq 0,03$	-	$d_{40-30} \geq 0,030$	0,032
h_0	при $\theta = 0^{\circ}$	$h_0 \geq 0,350$	0,600

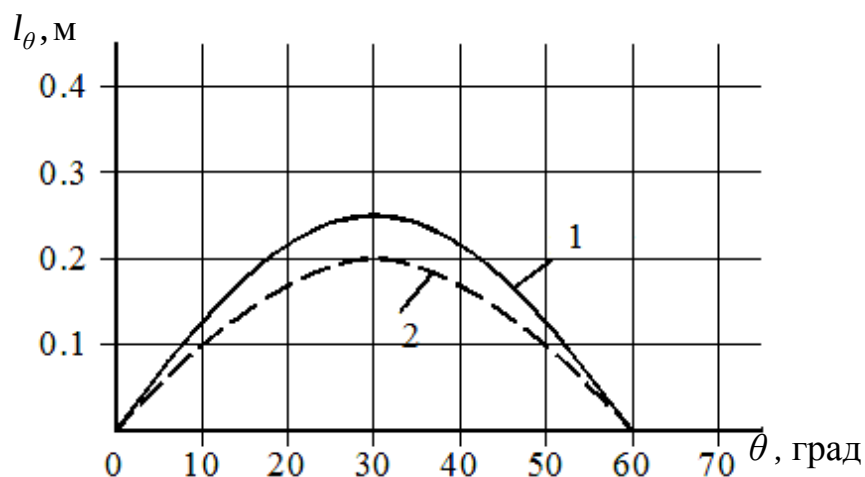


Рисунок 3.5 – Предельно допустимая диаграмма статической остойчивости по требованиям: 1 – Правил Регистра судоходства Украины при $L \leq 80$ м, 2 – Международной морской организации (ИМО)

3.5.2. Анализ остойчивости неповреждённых малых морских судов

На рисунке 3.6 приведены диаграммы плеч статической остойчивости и в таблице 3.7 характеристики и главные размерения малых пассажирских судов различных типов, заимствованных из работы [33]. Для сравнения также нанесены минимально допустимые диаграммы, отвечающие требованиям Морского Регистра судоходства Украины и ИМО. Из сравнения видно, что диаграммы l_θ для пассажирских катеров (1, 2, 3, 4), постройки до выхода "Временных норм остойчивости", т.е. до 1948 г. не удовлетворяют "нормам остойчивости". Что же касается пассажирских катеров более поздней постройки, то их диаграммы также незначительно превышают минимальные требования, предъявляемые Регистром судоходства Украины. В связи с этим, учитывая особенности прибрежного плавания Регистром были введены ограничения использования пассажирских судов, как по условиям погоды, так и по районам плавания.

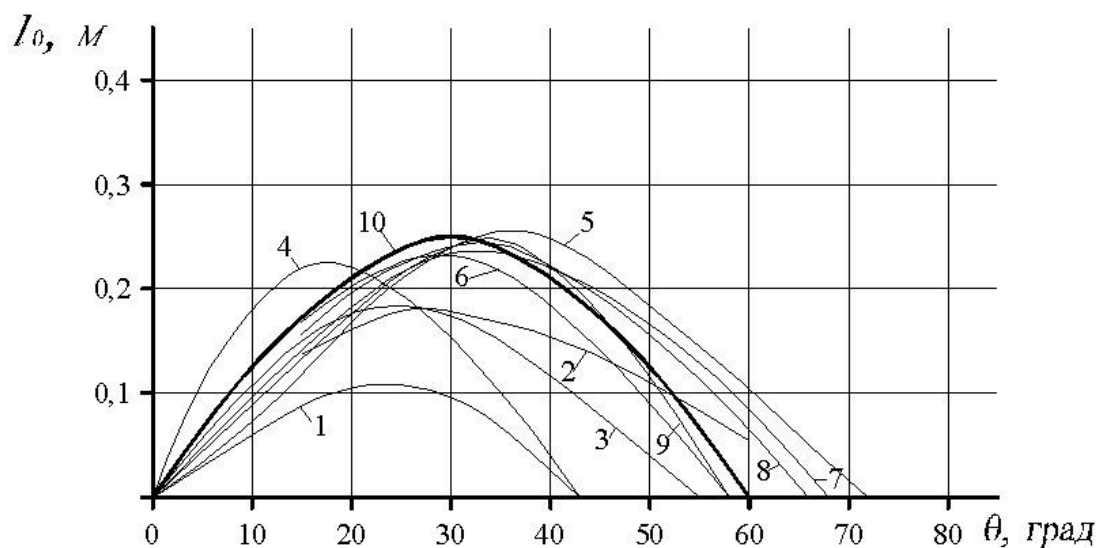


Рисунок 3.6 – Диаграммы статической остойчивости малых пассажирских судов

1 – т/х "Петр Лукомский"; 2 – сочинский катер МК-4; 3 – сочинский катер МК-12; 4 – катер МА для Севастополя; 5 – катер типа "Алмаз"; 6 – катер типа "Аркадия"; 7 – "Радуга", I серия; 8 – "Радуга", II серия; 9 – "Александр Грин"; 10 – Правила Регистра при $L \leq 80$ м

Наиболее жёсткие ограничения по мореходности предъявлялись к пассажирским катерам типа "Ласточка". Эти катера в 1947 г. ялтинские портовики начали строить собственными силами в мастерских порта. Катера типа "Ласточка" на 55 пассажирских мест, пока не было развёрнуто строительство более мореходных судов, имели деревянный корпус, пассажиры на "Ласточке" размещались в средней части корпуса под тентом. Палуба в этом районе отсутствовала. В качестве главного двигателя на "Ласточке" устанавливались бензиновые автомобильные двигатели ГАЗ, ЗИС-5, ЗИС-120, а затем дизеля, СП9,5/11, мощностью 55 л.с., К-551 – 80 л.с. и др. В 1953 г. было развёрнуто строительство более мореходных пассажирских катеров типа "Алмаз", с двигателем типа 3Д12, мощностью 300 л.с., скоростью хода 11,2 уз. И пассажироместимостью 123 человека. На кате-

рах типа "Алмаз" было разрешено Регистром удаление от берега до 10 миль, а от убежища до 20 миль при допустимом волнении 4 балла и ветре 5 баллов (см. таблицу 3.8).

Однако, практика эксплуатации показала, что удаление от берега до 10 миль достаточно опасно и на следующей серии пассажирских катеров типа "Аркадия", постройки 1956 года, оно было уменьшено до 2 миль. Даже на более крупных и мореходных пассажирских катерах типа "Александр Грин", постройки 1970 года, пассажировместимостью 200 чел. и скоростью хода 14,2 уз., удаление от берега было увеличено только до 3-х миль.

На рисунке 3.7 приведены диаграммы плеч статической остойчивости, а в таблице 3.9 соответствующие данные по остойчивости для ряда малых рыболовных судов.

Проанализируем характеристики остойчивости малых рыболовных судов. Можно видеть, что они в основном удовлетворяют предельно допустимой диаграмме (см. диаграмму № 10). Из приведенных данных по рыболовным судам можно выделить №5 – сейнер А.1.2.1, $L = 22,0$ м и $B = 5,6$ м – проект 574, который имеет диаграмму статической остойчивости удовлетворяющую нормам Регистра с некоторым запасом и достаточно высокую метацентрическую высоту $h_0 = 0,203$ м. Однако можно построить судно с гораздо большей диаграммой. Так Шведский малый траулер (см. диаграмму № 6), длиной $L = 18,3$ м имеет существенно большую диаграмму статической остойчивости и значение $h_0 = 1,06$ м и $B = 5,98$ м. Отметим, что авторы данного судна при проектировании очевидно отдали предпочтение остойчивости судна, в ущерб резкости качки, приняв $h_0 = 1,06$ м. Добились они этого за счет увеличения относительной ширины судна и принятия твёрдого балласта.

Анализ диаграмм остойчивости малых судов необходимо подчеркнуть, что при проектировании можно подобрать такие суда-прототипы, которые бы имели более высокие диаграммы статической остойчивости, чем предельно допустимая, и использовать их в качестве прототипов при проектировании новых судов. Необходимая остойчивость малых морских судов, в первую очередь, может быть обеспечена за счет достаточной ширины судна и высоты надводного борта проектируемого судна, а также приёма небольшого количества твёрдого балласта.

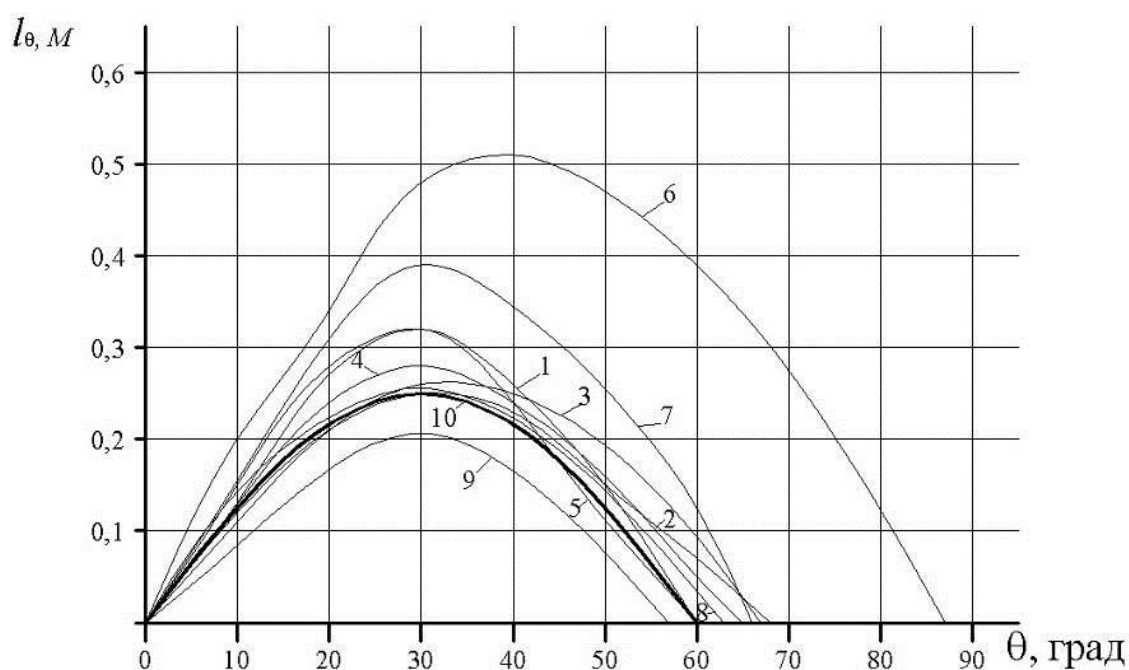


Рисунок 3.7 – Диаграммы статической остойчивости малых рыболовных судов

- 1 – Сейнер А.1.3.2; 2 – Сейнер А.1.3.2; 3 – Малый траулер А.1.2.1;
 4 – Сейнер А.1.2.1; 5 – Сейнер А.1.2.1; 6 – Малый траулер №3, Швеция;
 7 – ДМС; 8 – Мотобот; 9 – МЧС; 10 – Правила Регистра

Таблица 3.5 – Плечи статической остойчивости малых пассажирских судов

№ п/п	Наименование судна	Δ , т	L , м	B , м	D	d	v_s , уз	h_0 , м	10^0	20^0	30^0	40^0	$\theta_{\max}^{\circ}$	$l_{\theta_{\max}}$	θ_0°
1	"Пётр Лукомский"							0,23	0,06	0,105	0,090	0,020	34	0,100	43
2	МК – 4, Сочи	37,0	17,7	3,55	1,9	1,27	-	-	-	0,160	0,178	0,154	38	0,180	69
3	МК – 12, Сочи	46,7	17,7	4,23	2,1	1,47	-	-	0,108	0,176	0,174	0,110	25	0,184	55
4	МА для Севастополя	39	18,9	4,5	1,4	1,07	10,5	-	0,180	0,220	0,152	0,040	18	0,224	43
5	"Алмаз"	105,0	24,0	5,2	2,8	1,85	11,2	0,43	0,072	0,168	0,244	0,248	37	0,256	72
6	"Аркадия"	54,2	21,0	4,4	2,1	1,43	10,2	0,61	-	0,202	0,232	0,184	30	0,232	58
7	"Радуга", I серия	55,0	21,0	4,4	2,25	1,44	10,2	-	0,096	0,182	0,234	0,220	33	0,236	68
8	"Радуга", II серия	52,6	23,3	4,4	2,25	1,38	12,2	0,59	0,000	0,196	0,240	0,222	34	0,244	66
9	"Александр Грин"	95	30,0	5,1	2,55	1,5	14,2	0,5	0,088	0,176	0,240	0,208	34	0,248	58
10	"Ласточка"	15,8	12,9	3,4	1,3	0,72	10,0								
11	Правила Регистра								0,125	0,216	0,250	0,216	30	0,250	60

Таблица 3.6 – Ограничения использования пассажирских судов по условиям погоды и районам плавания

№ п/п	Наименование судов	Допустимая бальность при перевозке пассажиров		Разрешённое удаление, мили		v_s , уз
		волнение	ветер	от порта	от берега	
1	"Ласточка"	2 – 3	3 – 4	3 – 5	1	-
2	"Алмаз"	4	5	20	10	11,2
3	"Аркадия"	3	5	15	2	10,2
4	"Радуга", II серия	3	5	20	2	12,2
5	"Александр Грин"	4	6	20	3	14,2

На рисунке 3.8 приведены диаграммы статической остойчивости для малого, среднего и большого рыболовных судов. Сравнение диаграмм статической остойчивости, как указывалось ранее, показывает, что для судов, имеющих ширину судна $B \geq 10$ м диаграммы имеют громадный запас остойчивости по сравнению с требованиями Регистра Украины. Из изложенного следует, что для малых морских судов **задача улучшения диаграммы статической остойчивости проектируемого судна является наиболее значимой.**

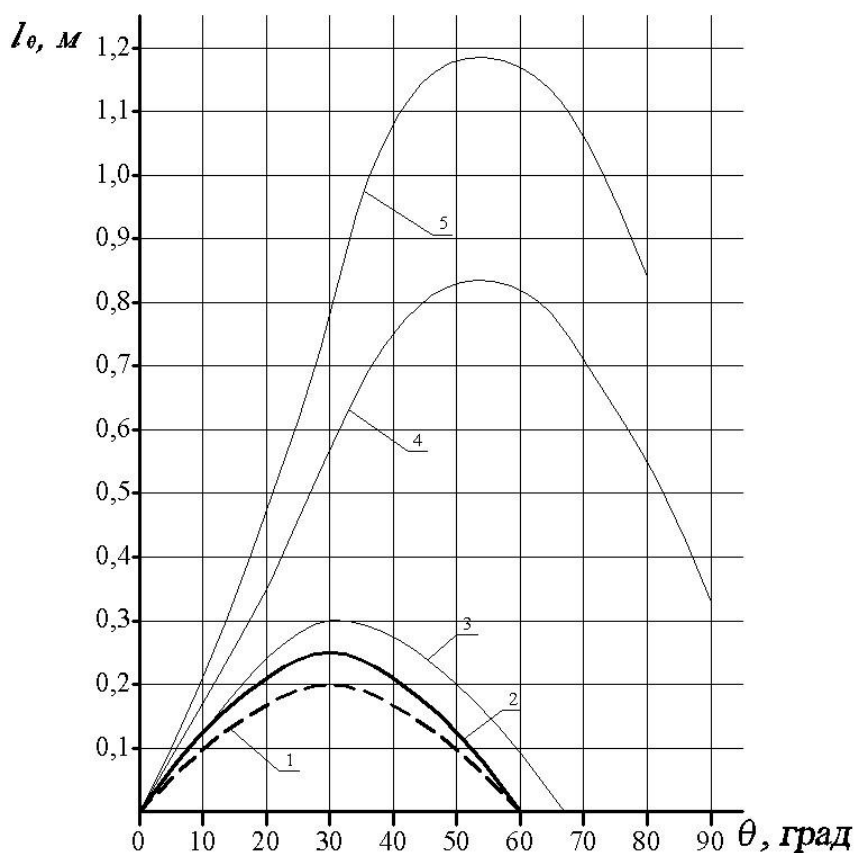


Рисунок 3.8 – Диаграммы статической остойчивости различных рыболовных судов

- 1 – Международная морская организация (ИМО); 2 – Правила Регистра судоходства Украины при $L \leq 80$ м.; 3 – Сейнер СЧС ($L = 22,0$ м, $B = 5,6$ м, $\Delta = 106$ т, $h = 0,70$ м); 4 – Траулер "Канада" ($L = 39,6$ м, $B = 10,6$ м, $\Delta = 819$ т, $h = 0,74$ м); 5 – БМРТ "Лесков" ($L = 75,0$ м, $B = 13,8$ м, $\Delta = 3451$ т, $h = 1,09$ м)

Таблица 3.7 – Плечи статической остойчивости малых рыболовных судов

№ п/п	Наименование судна	Δ , т	L , м	B , м	D	d	C_b	ζ	h_0 , м	10^0	20^0	30^0	40^0	$\theta_{\max}^{\circ}$	$l_{\theta_{\max}}$	θ_0°
1	Сейнер А.1.3.2, СССР	58	16,5	4,80	2,00	1,43	0,470	0,915	0,77	0,14	0,27	0,31	0,26	30	0,312	62
2	Сейнер А.1.3.2, СССР	101	19,9	5,25	2,50	1,98	0,470	0,744	0,62	0,12	0,21	0,255	0,23	30	0,255	68
3	Малый траулер А.1.2.1, СССР	161	20,8	6,50	3,33	2,48	0,438	0,763	0,63	0,11	0,21	0,26	0,25	32	0,262	67
4	Сейнер А.1.2.1, СССР	119	22,0	5,60	2,84	2,12	0,508	0,803	0,72	0,13	0,24	0,28	0,24	30	0,280	65
5	Сейнер А.1.2.1, СССР	162	23,2	6,00	3,00	2,13	0,580	0,806	0,66	0,13	0,27	0,32	0,24	30	0,320	60
6	Малый траулер № 3, Швеция	105	18,3	5,98	2,92	2,3	0,488	0,736	1,06	0,18	0,34	0,39	0,39	34	0,4	87
7	ДМС	80	19,0	5,60	2,50	1,63	0,407	0,852	0,87	-	0,309	0,384	0,348	32	0,387	66
8	Мотобот	80	19,0	5,52	2,85	2,03	0,458	0,814	0,70	-	0,224	0,256	0,223	30	0,256	63
9	МЧС	66	18,0	5,11	2,40	1,55		0,854	0,59	-	0,177	0,203	0,165	29	0,206	57
10	Правила Регистра								0,75	0,125	0,216	0,250	0,216	30	0,250	60

3.5.3. Постановка задачи повышения остойчивости малых морских судов

Выполненный анализ остойчивости малых морских судов показывает, что вновь проектируемые малые суда имеют диаграмму статической остойчивости достаточно близкой к предельно допустимой по требованиям Правил Регистра.

Таким образом, если проектируемое судно удовлетворяет требованиям Регистра судоходства Украины, то такое судно юридически является остойчивым. Однако опыт эксплуатации показывает, что наибольшее количество погибших судов от потери остойчивости остаётся за малыми морскими судами.

С одной стороны это можно объяснить более низкой квалификацией экипажей малых морских судов. Но с другой стороны, необходимо подчеркнуть, что гибнут в основном малые суда в условиях более жестких чем предусмотренные Правилами, особенно по ветровым нагрузкам и волнению. Естественно, квалификация экипажей судов, а также качество норм остойчивости судов непрерывно совершенствуются, но существует и третий путь улучшения остойчивости малых морских судов *за счет увеличения диаграммы статической остойчивости в функции основных характеристик судов, при условии их малых изменений.*

Итак, поставим задачу: выполнить ранжировку влияния основных характеристик проектируемого судна на остойчивость при больших углах крена с последующим улучшением диаграммы статической остойчивости при малых изменениях независимых переменных. При этом необходимо учитывать требования к точности выполняемых расчетов, так как здесь мы сталкиваемся с малыми разностями больших величин, а именно: выразим плечо статической остойчивости как $l_{\theta} = y_c \cdot \cos \theta + (z_c - z_{c0}) \cdot \sin \theta - a \cdot \sin \theta$ или $l_{\theta} = l_{\phi} - l_{\epsilon} \geq 0,25 \text{ м}$ при $\theta \geq 30^{\circ}$.

Таким образом, для определения максимального плеча диаграммы статической остойчивости с обычной инженерной точностью 5% от искомой величины, имеем при $l_{\max}=0,25$ м по Правилам Регистра, величину $\Delta l=0,05:0,25=\pm 0,0125$ м.

Следовательно, если l_ϕ и l_g будут иметь величину $0,5 \div 1,5$ м., то точность их определения должна быть исключительно высокой и лежать в пределах $1 \div 2\%$ от искомой величины.

Исходя из изложенного, для определения плеча остойчивости формы l_ϕ целесообразно использовать метод аффинных преобразований теоретического чертежа судна-прототипа на чертёж проектируемого судна, учитывая, что он даёт точный пересчет диаграммы остойчивости в функции главных размерений. Но при этом необходимо учитывать, что этот метод работает только при условии постоянства коэффициентов полноты корпуса и отношения $\frac{D}{d}=Const$.

Кроме того определение изменения величины $dl_\phi = f(C_b, C_\omega, k)$ целесообразно выполнять дифференциальным методом, но при условии малых изменений C_b, C_ω, k в виде

$$dl_{\phi \text{ диф}} = \frac{\partial l_\phi}{\partial C_b} dC_b + \frac{\partial l_\phi}{\partial C_\omega} dC_\omega + \frac{\partial l_\phi}{\partial k} dk. \quad (3.59)$$

Что же касается условия $\frac{D}{d}=Const$, то используя графики зависимостей $y_c = f\left(\frac{D}{d}\right)$ и $z_c = f\left(\frac{D}{d}\right)$ судна-прототипа (см. рисунок 3.9) можно снимать искомые ординаты y_c и z_c с графиков для заданного отношения $\frac{D}{d}$ проектируемого судна.

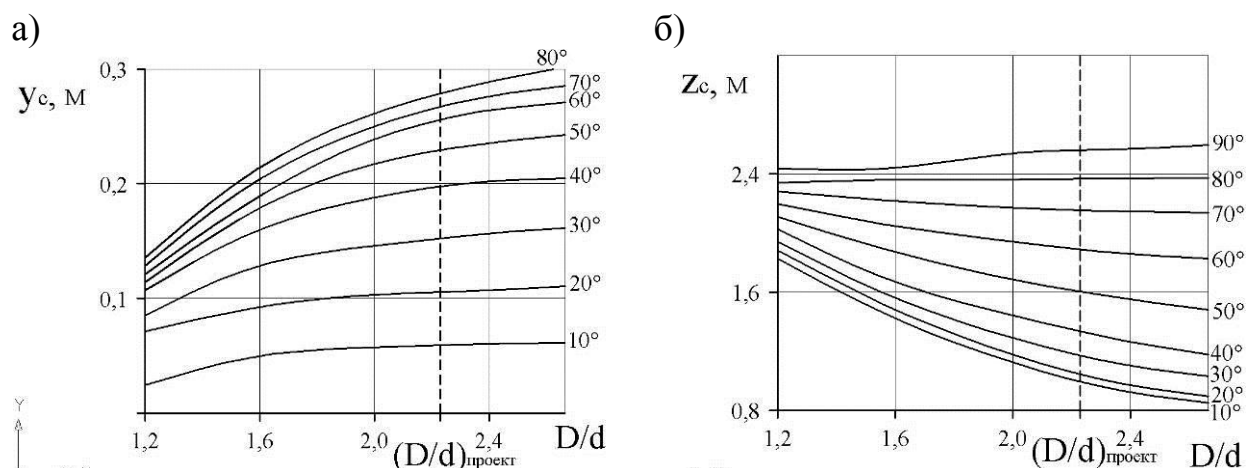


Рисунок 3.9 – Графики: $y_c = f\left(\frac{D}{d}\right)$ (а) и $z_c = f\left(\frac{D}{d}\right)$ (б) для судна-прототипа

3.5.4. Пересчет диаграммы статической остойчивости судна-прототипа при аффинных преобразованиях теоретического чертежа

Плечо статической остойчивости судна-прототипа определим как

$$l_{\theta_0} = y_{C_0} \cdot \cos \theta + (z_c - z_{C_0})_0 \cdot \sin \theta - a_0 \cdot \sin \theta, \quad (3.60)$$

где l_{θ_0} – плечо статической остойчивости судна-прототипа, м.

При заданных масштабах пересчёта $b = \frac{B}{B_0}$ и $t = \frac{d}{d_0}$, получим плечо

статической остойчивости проектируемого судна в виде

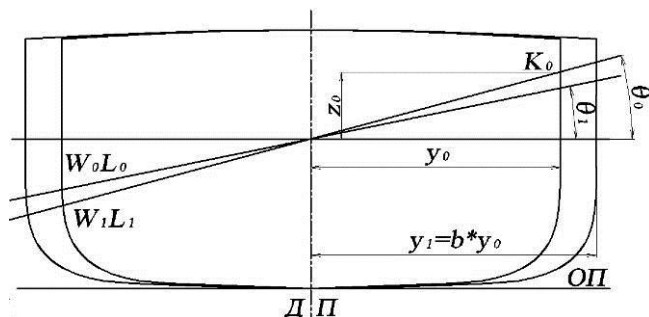
$$l_{\theta_0} = b \cdot y_{C_0} \cdot \cos \theta + t \cdot (z_c - z_{C_0})_0 \cdot \sin \theta_1 - t \cdot a_0 \cdot \sin \theta_1.$$

Соответственно, при увеличении ширины изменится угол крена (см. рисунок 3.10 а, б) равный

$$\operatorname{tg} \theta_1 = \frac{z_0}{y_1} = \frac{z_0}{b \cdot y_0} = \frac{1}{b} \cdot \operatorname{tg} \theta_0, \quad (3.61)$$

где $\operatorname{tg} \theta_0 = \frac{z_0}{y_0}$ – начальный угол крена.

а) увеличение ширины судна в масштабе $b = \frac{B_1}{B_0} = \frac{D_1}{D_0}$



б) увеличение высоты борта судна в масштабе $t = \frac{D_1}{D_0} = \frac{d_1}{d_0}$

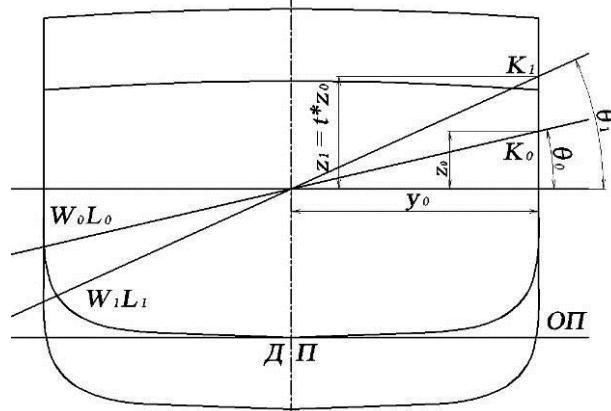


Рисунок 3.10 – Аффинные преобразования теоретического чертежа судна-прототипа

При увеличении высоты борта судна-прототипа, получим

$$\operatorname{tg} \theta_1 = \frac{z_1}{y_0} = \frac{(t \cdot z_0)}{y_0} = t \cdot \operatorname{tg} \theta_0. \quad (3.62)$$

При увеличении одновременно ширины и высоты борта судна-прототипа, получим

$$\operatorname{tg} \theta_1 = \frac{z_1}{y_1} = \frac{t \cdot z_0}{b \cdot y_0} = t \cdot \operatorname{tg} \theta_0. \quad (3.63)$$

Пересчёт плеча статической остойчивости проектируемого судна удобно производить в табличной форме [57]. Отметим, что формула (3.62) при пересчёте с судна-прототипа на проект **даёт точный результат**. Недостатком метода аффинных преобразований является постоянство коэффициентов полноты теоретического чертежа, а также отношения $\frac{D}{d}$.

3.5.5. Пересчет диаграммы статической остойчивости дифференциальным методом при изменении коэффициентов полноты корпуса судна

Рассмотрим изменение плеча статической остойчивости в виде

$$dl_{\text{оиф}} = \frac{\partial l_{\theta}}{\partial C_b} dC_b + \frac{\partial l_{\theta}}{\partial C_{\omega}} dC_{\omega} + \frac{\partial l_{\theta}}{\partial k} dk + \frac{\partial l_{\phi}}{\partial \xi} d\xi. \quad (3.64)$$

Уравнение (3.64) принято называть дифференциальным уравнением изменения плеча статической остойчивости проектируемого судна. Полное плечо статической остойчивости при изменении коэффициентов полноты корпуса проектируемого судна будет равно

$$l_{\theta} = l_{\theta_0} + dl_{\text{оиф}}, \quad (3.65)$$

где l_{θ_0} – плечо статической остойчивости судна-прототипа.

В качестве исходной формулы для определения плеча статической остойчивости применим формулу В.Г. Власова – С.Н. Благовещенского в виде [44]

$$l_{\theta} = y_{c_{90}} f_1(\theta) + (z_{c_{90}} - z_{c_0}) f_2(\theta) + r_0 f_3(\theta) + r_{90} f_4(\theta) - a \cdot \sin(\theta), \quad (3.66)$$

где $y_{c_{90}}$ и $z_{c_{90}}$ – координаты центра величины при наклонении судна на 90° ; r_0 и r_{90} – метацентрические радиусы в прямом положении судна и при крене 90° ; z_{c_0} и z_g – ординаты центра величины и центра тяжести в прямом положении судна; $a = z_g - z_{c_0}$; $f_i(\theta)$ – линейные комбинации тригонометрических функций от угла крена, приведены в справочниках по теории корабля [12].

Величины r_0 , r_{90} , $y_{c_{90}}$, $z_{c_{90}}$, z_{c_0} , z_g определим по приближенным формулам, вида

$$z_{c_0} = \frac{C_\omega}{C_\omega + C_b} \cdot d; r_0 = \frac{1}{m} \cdot \frac{C_\omega^2}{C_b} \cdot \frac{B^2}{d}; z_g = \xi \cdot d, \quad (3.67)$$

а также формулам, предложенным академиком В.Л. Поздюниным,

$$\left. \begin{aligned} y_{c_{90}} &= \frac{B}{2} \cdot \left(1 - c \cdot \frac{d}{D_1} \right); \\ z_{c_{90}} - z_{c_0} &= c_1 \cdot \left(1 - c_2 \cdot \frac{d}{D_1} \right) \cdot D_1; \\ r_{90} &= r_0 \cdot \left(\frac{z_{c_{90}} - z_{c_0}}{y_{c_{90}}} \right)^3 \end{aligned} \right\}. \quad (3.68)$$

Здесь c , c_1 , c_2 – константы, определяемые по статистическим данным или по данным судна-прототипа; D_1 – приведенная высота борта, определяемая по формуле

$$D_1 = D \cdot \left(1 + \left(\frac{W_H}{W} \right) \right)^\chi, \quad (3.69)$$

где D – расчетная высота борта, м; W – кубатура корпуса от киля до горизонтальной плоскости, проходящей через наинизшую точку борта, м³; W_H – кубатура вышележащих водонепроницаемых частей судна, включаемых в расчет остойчивости на больших углах крена, м³; $\chi = \frac{C_b}{C_\omega}$ – коэффициент вертикальной полноты корпуса судна.

Н.Б. Севастьянов [58] ввел понятие условного коэффициента седловатости в виде

$$k = 1 + \frac{W_H}{W}, \quad (3.70)$$

тогда приведенную высоту борта можно определить как

$$D_1 = k^\chi \cdot D. \quad (3.71)$$

Представим формулу (3.71) в общем виде, как

$$l_{\theta} = \sum_{i=1}^{i=5} z_{g_i} \cdot f_i(\theta), \quad (3.72)$$

где z_{g_i} – значение центра величины и центра тяжести, а также метацентрического радиуса в прямом положении и при крене 90° .

Значение частных производных типа $\frac{\partial \varphi_i}{\partial x_i}$ определим дифференцированием с учетом формул (3.69 – 3.72) (см. таблицу 3.8)

Таблица 3.8 – Расчётные формулы частных производных типа $\frac{\partial \varphi_i}{\partial x_i}$

φ_i	$\frac{\partial \varphi_i}{\partial C_b}$	$\frac{\partial \varphi_i}{\partial C_{\omega}}$	$\frac{\partial \varphi_i}{\partial k}$	$\frac{\partial \varphi_i}{\partial \xi}$
$\varphi_1 = y_{c_{90}}$	$\frac{\chi \cdot (0.5 \cdot B - y_{c_{90}}) \cdot \ln k}{C_b}$	$\frac{\chi \cdot (0.5 \cdot B - y_{c_{90}}) \cdot \ln k}{C_{\omega}}$	$\frac{\chi \cdot (0.5 \cdot B - y_{c_{90}})}{k}$	0
$\varphi_2 = z_{c_{90}} - z_{c_0}$	$\frac{\chi \cdot z_{c_{90}} \cdot \ln k + \frac{\chi}{1 + \chi} \cdot z_{c_0}}{C_b}$	$-\frac{\chi \cdot z_{c_{90}} \cdot \ln k - \frac{\chi}{1 + \chi} \cdot z_{c_0}}{C_{\omega}}$	$\frac{\chi \cdot z_{c_{90}}}{k}$	0
$\varphi_3 = r_0$	$-\left(\frac{r_0}{C_b}\right)$	$\frac{2r_0}{C_{\omega}}$	0	0
$\varphi_4 = r_{90}$	$-\frac{(1 - 3 \cdot \chi \cdot \ln k) \cdot r_{90}}{C_b}$	$\frac{(2 - 3 \cdot \chi \cdot \ln k) \cdot r_{90}}{C_{\omega}}$	$\frac{3 \cdot \chi \cdot r_{90}}{k}$	0
$\varphi_5 = -a$	$-\frac{\frac{\chi}{1 + \chi} \cdot z_{c_0}}{C_b}$	$\frac{\frac{\chi}{1 + \chi} \cdot z_{c_0}}{C_{\omega}}$	0	$-D$

Таким образом, задаваясь приращениями безразмерных параметров формы обводов корпуса проектируемого судна, мы имеем возможность перестроить диаграмму статической остойчивости судна-прототипа в нужном нам направлении.

Рассмотрим пример. В качестве судна-прототипа примем сейнер типа РС-300. Исходные данные: $L_{\perp\perp} = 30$ м, $B = 6,6$ м, $D = 3,5$ м, $d = 2,5$ м,

$$\frac{L}{B} = 4,55, \quad \frac{B}{d} = 2,64, \quad \frac{D}{d} = 1,40, \quad C_b = 0,48, \quad C_{\omega} = 0,80, \quad C_m = 0,71, \quad k = 1,15,$$

$z_g = 2,80$ м, $z_{c_{90}} = 2,44$ м, $z_{c_0} = 1,59$ м, $y_{c_{90}} = 1,33$ м, $r_{90} = 0,67$ м, $r_0 = 1,98$ м, $\zeta = 0,80$, $\nabla = 236$ м³, $\Delta = 242$ т.

Используя данные судна-прототипа, по формулам, приведенным в таблице 3.8, подсчитаем частные производные типа $\frac{\partial \varphi_i}{\partial x_i}$ (таблица 3.9).

Согласно формулы 3.65 плечо статической остойчивости проектируемого судна определим

$$l_{\theta} = l_{\theta_0} + \frac{\partial l_{\theta}}{\partial C_b} dC_b + \frac{\partial l_{\theta}}{\partial C_{\omega}} dC_{\omega} + \frac{\partial l_{\theta}}{\partial \kappa} d\kappa + \frac{\partial l_{\theta}}{\partial \zeta} d\zeta. \quad (3.73)$$

Таблица 3.9 – Значения частных производных типа $\frac{\partial \varphi_i}{\partial x_i}$ для сейнера РС-300

φ_i	$\frac{\partial \varphi_i}{\partial C_b}$	$\frac{\partial \varphi_i}{\partial C_{\omega}}$	$\frac{\partial \varphi_i}{\partial \kappa}$	$\frac{\partial \varphi_i}{\partial \zeta}$
$\varphi_1 = y_{c_{90}}$	0,344	-0,206	1,030	0,00
$\varphi_2 = z_{c_{90}} - z_{c_0}$	1,670	-1,000	1,270	0,00
$\varphi_3 = r_0$	-4,120	4,950	0,00	0,00
$\varphi_4 = r_{90}$	-1,040	1,470	0,940	0,00
$\varphi_5 = -a$	-1,240	0,745	0,00	-3,50

Используя уравнение 3.72 и приближенные формулы (3.67 – 3.69), плечо статической остойчивости проектируемого судна при $\theta = const$ определим

$$l_{\theta} = l_{\theta_0} + dC_b \sum_{i=1}^{i=5} \frac{\partial}{\partial C_b} f_i(\theta) + dC_{\omega} \sum_{i=1}^{i=5} \frac{\partial}{\partial C_{\omega}} f_i(\theta) + d\kappa \sum_{i=1}^{i=5} \frac{\partial}{\partial \kappa} f_i(\theta) + d\zeta \sum_{i=1}^{i=5} \frac{\partial}{\partial \zeta} f_i(\theta). \quad (3.74)$$

Соответственно, в таблице (3.10) приведены значения частных производных типа $\frac{\partial \varphi_i}{\partial x_i}$ для сейнера РС-300, а на рисунке 3.11 графики частных

производных типа $\frac{\partial \varphi_i}{\partial x_i}$.

Таблица 3.10 – Сводная таблица производных типа $\frac{\partial l_{\theta}}{\partial x_i}$ для сейнера

РС-300

Частные производные	θ°									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$\frac{\partial l_{\theta}}{\partial C_b}$	0,00	-0,891	-1,532	-1,734	-1,440	-0,769	-0,028	0,488	0,611	0,430
$\frac{\partial l_{\theta}}{\partial C_w}$	0,00	0,918	1,429	1,355	0,824	0,138	-0,383	-0,600	-0,515	-0,255
$\frac{\partial l_{\theta}}{\partial k}$	0,00	0,014	0,099	0,286	0,547	0,820	1,045	1,193	1,261	1,270
$\frac{\partial l_{\theta}}{\partial \zeta}$	0,00	-0,609	-1,203	-1,750	-2,250	-2,680	-3,030	-3,290	-3,450	-3,500

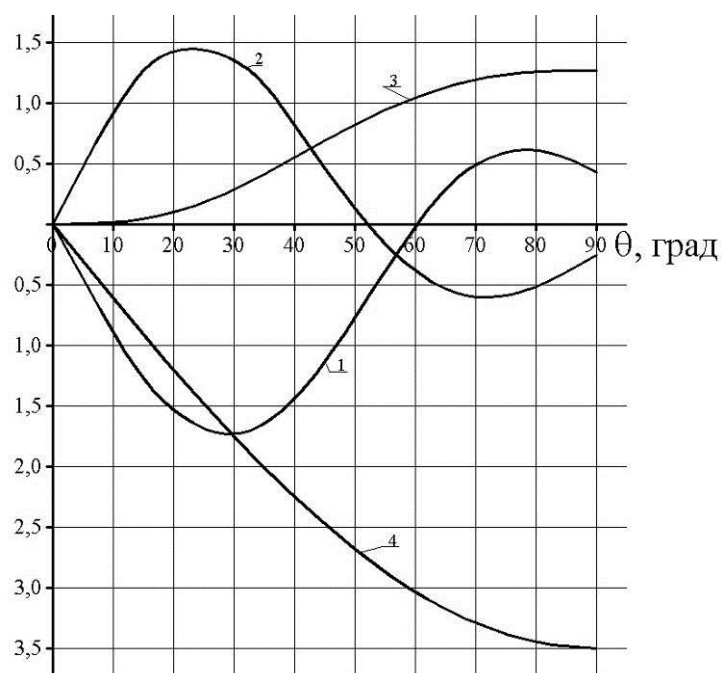


Рисунок 3.11 – Графики частных производных типа $\frac{\partial l_{\theta}}{\partial x_i}$ для сейнера РС-

300

$$1 - \frac{\partial l_{\theta}}{\partial C_b}; 2 - \frac{\partial l_{\theta}}{\partial C_w}; 3 - \frac{\partial l_{\theta}}{\partial k}; 4 - \frac{\partial l_{\theta}}{\partial \zeta}$$

На рисунке 3.12 приведена диаграмма статической остойчивости сейнера РС-300 для случая нагрузки "Возвращение с промысла со 100% груза и 50% запасов". Из диаграммы видно что остойчивость удовлетворяет требованиям Правил Регистра судоходства, однако с очень малым запасом. Если поставить задачу модернизации судна с одновременным улучшением диаграммы статической остойчивости, то наиболее эффективным способом увеличения плеча статической остойчивости является изменение значений коэффициента общей полноты, коэффициента полноты миделя, коэффициента седловатости и коэффициента развития надстроек.

В таблице 3.11 выполнен пересчёт плеча статической остойчивости $l_\theta = f(C_\omega, C_b, k, \zeta)$ для сейнера типа РС-300, а на рисунке 3.12 нанесён ряд диаграмм статической остойчивости судна, из которых следует, что максимальное плечо статической остойчивости $l_{\theta_{\max}}$ увеличилось почти в двое, а угол заката диаграммы увеличился на 12° .

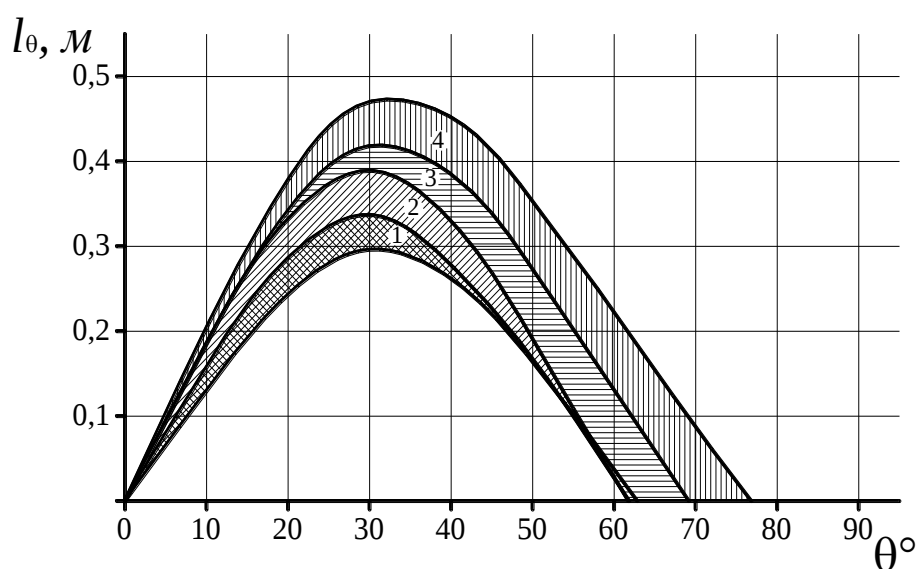


Рисунок 3.12 – Пересчет диаграммы статической остойчивости сейнера РС-300: 1, 2, 3, 4 – приращение плеч статической

остойчивости: $dl_\theta = \frac{\partial l_\theta}{\partial C_\omega} dC_\omega$, $dl_\theta = \frac{\partial l_\theta}{\partial C_b} dC_b$, $dl_\theta = \frac{\partial l_\theta}{\partial k} dk$, $dl_\theta = \frac{\partial l_\theta}{\partial \zeta} d\zeta$

Таблица 3.11 – Пересчёт плеча статической остойчивости $l_{\theta} = f(C_{\omega}, C_b, k, \zeta)$ для сейнера типа РС-300

№ п/п	θ°	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
1	$l_{\theta_0}, \text{ м}$	0	0,130	0,243	0,296	0,262	0,164	0,038	-0,098	-0,235	-0,360
2	$dl_{\theta} = \frac{\partial l_{\theta}}{\partial C_{\omega}} dC_{\omega}; dC_{\omega} = 0,03$	0	0,028	0,043	0,041	0,025	0,004	-0,011	-0,018	-0,015	-0,008
3	$l_{\theta} = l_{\theta_0} + dl_{\theta}, \text{ м}$	0	0,158	0,286	0,337	0,278	0,168	0,027	-0,116	-0,250	-0,368
4	$dl_{\theta} = \frac{\partial l_{\theta}}{\partial C_b} dC_b;$ $dC_b = -0,03$	0	0,027	0,046	0,052	0,043	0,023	0,001	-0,015	-0,018	-0,013
5	$l_{\theta} = l_{\theta_0} + dl_{\theta}, \text{ м.}$	0	0,185	0,332	0,389	0,330	0,191	0,028	-0,131	-0,268	-0,381
6	$dl_{\theta} = \frac{\partial l_{\theta}}{\partial k} dk; dk = 0,10$	0	0,001	0,010	0,029	0,055	0,082	0,104	0,119	0,126	0,127
7	$l_{\theta} = l_{\theta_0} + dl_{\theta}, \text{ м.}$	0	0,186	0,342	0,418	0,385	0,273	0,132	-0,012	-0,142	-0,254
8	$dl_{\theta} = \frac{\partial l_{\theta}}{\partial \zeta} d\zeta; d\zeta = -0,03$	0	0,018	0,036	0,052	0,067	0,08	0,091	0,099	0,103	0,105
9	$l_{\theta} = l_{\theta_0} + dl_{\theta}, \text{ м}$	0	0,204	0,378	0,470	0,452	0,353	0,223	0,087	-0,039	-0,149

Из изложенного следует, что при сравнительно небольших изменениях формы обводов корпуса судна можно существенно улучшить характеристики его остойчивости.

3.6. Влияние главных размерений и коэффициентов полноты корпуса на характеристики вместимости проектируемого судна

3.6.1. Уравнение вместимости В.Л. Поздюнина

В.Л. Поздюнин для определения вместимости (объёма) основного корпуса предложил использовать строевую по ватерлиниям проектируемого судна (рисунок 3.13).

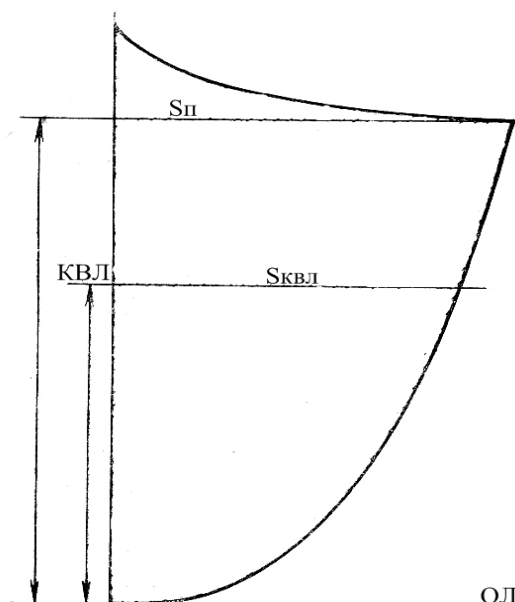


Рисунок 3.13 – Строевая по ватерлиниям, доведенная до верхней точки седловатости

Опишем приближенно строевую по ватерлиниям в виде параболы n -ой степени [52].

$$\frac{S_z}{S_{КВЛ}} = \left(\frac{z}{d} \right)^n. \quad (3.75)$$

Соответственно, водоизмещение проектируемого судна определим, как

$$\nabla = \int_0^d S_z dz = \frac{S_{\kappa\mathcal{L}}}{d^n} \cdot \frac{z^{n+1}}{n+1} \Big|_0^d,$$

откуда

$$\nabla = \frac{C_{wp}}{n+1} LBd. \quad (3.76)$$

По уравнению плавучести имеем

$$\nabla = LBdC_b.$$

Итак, приравнявая правые части, получим

$$\frac{C_b}{C_{wp}} = \frac{1}{n+1}, \text{ или } \chi = \frac{1}{n+1}. \quad (3.77)$$

Показатель степени параболы определится, как

$$n = \frac{1-\chi}{\chi}, \quad (3.78)$$

где χ – коэффициент вертикальной полноты корпуса проектируемого судна.

Вместимость основного корпуса проектируемого судна до верхней палубы определим как

$$W'_\kappa = \int_0^D S_z dz = \frac{S_{\kappa\mathcal{L}}}{d^n} \cdot \frac{z^{n+1}}{n+1} \Big|_0^D, \quad (3.79)$$

откуда

$$W'_\kappa = \nabla \left(\frac{D}{d} \right)^{1/\chi}.$$

Соответственно, с учетом объёмов седловатости и погиби бимсов, получим

$$W_{\kappa} = K_c L B d C_b \left(\frac{D}{d} \right)^{1/\chi}, \quad (3.80)$$

где K_c – коэффициент, учитывающий увеличение объёма корпуса за счет учета седловатости и погиби бимсов.

Таким образом, полная (теоретическая) вместимость проектируемого судна определится

$$W = (1 + s) K_c L B d C_b \left(\frac{D}{d} \right)^{\frac{C_{wp}}{C_b}}. \quad (3.81)$$

Следовательно, вместимость судна зависит

$$W = f\left(L, B, d, \frac{D}{d}, \chi, C_b, K_c, s\right).$$

Подчеркнём, формула (3.81) дает достаточно точный результат только для параболической строевой. В общем случае В. Л. Поздюнин предлагал использовать эту формулу только для надводной части корпуса судна, интегрируя в пределах от d до D [52].

3.6.2. Уравнение вместимости В.В. Ашика

В.В. Ашик для определения вместимости (объёма) основного корпуса предложил использовать строевую по ватерлиниям проектируемого судна в виде (рисунок 3.14).

Объём (теоретическую вместимость) основного корпуса проектируемого судна, выразим [1]

$$W_{\kappa} = \nabla + W_B, \quad (3.82)$$

где W_{B1} – объём судна между КВЛ и параллельной ей ватерлинией, проведенной на уровне нижней точки расчётной палубы (ПВЛ) без учета развала бортов; W_{B2} – объём, образующий в результате развала бортов в надводной части; W_{B3} – объём, получающийся за счёт седловатости и погиби бимсов.

При этом

$$W_{B1} = S_{\kappa\beta, \lambda}(D-d), \quad (3.83)$$

$$W_{B2} = K_{B2}(S_n - S_{\kappa\beta, \lambda})(D-d), \quad (3.84)$$

$$W_{B3} = K_c D_c S_n, \quad (3.85)$$

где K_{B2} – коэффициент полноты объёма W_{B2} ; D_c – максимальная аппликата седловатости.

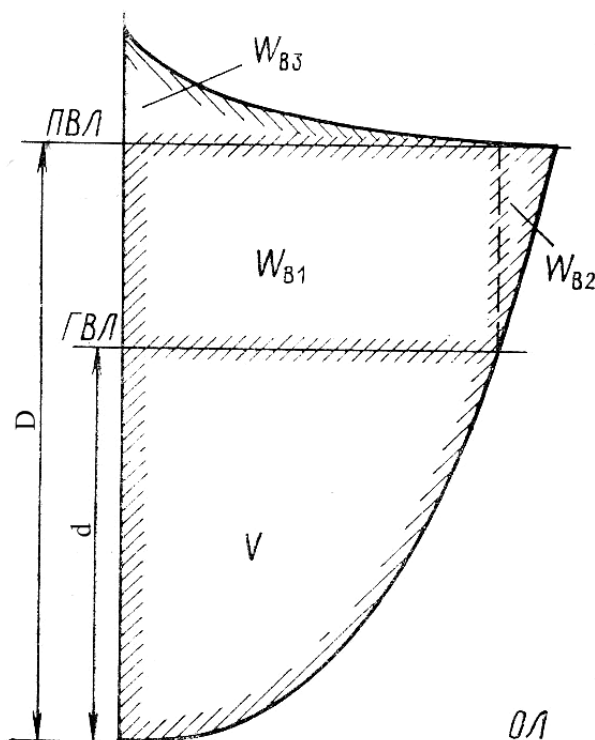


Рисунок 3.14 – Строевая по ватерлиниям, доведенная до верхней точки седловатости

Таким образом

$$W_B = S_{\kappa\beta, \lambda}(D-d) + K_{B2}(S_n - S_{\kappa\beta, \lambda})(D-d) + K_c D_c S_n. \quad (3.86)$$

Преобразуем

$$W_B = S_{\kappa\beta, \lambda}(D-d) \cdot \left[1 + K_{B2} \left(\frac{S_n}{S_{\kappa\beta, \lambda}} - 1 \right) + K_c \frac{D_c}{D-d} \frac{S_n}{S_{\kappa\beta, \lambda}} \right]. \quad (3.87)$$

Положим

$$K_B = K_{B2} \left(\frac{S_n}{S_{кв.л}} - 1 \right) + K_c \frac{D_c}{D-d} \frac{S_n}{S_{кв.л}} \quad (3.88)$$

после подстановки K_B в формулу (3.87), получим

$$W_B = S_{кв.л} (D-d) \cdot (1 + K_B), \quad (3.89)$$

где K_B – может быть вычислен для близкого судна- прототипа.

Объём основного корпуса проектируемого судна определится согласно (3.82)

$$\begin{aligned} W_k &= \nabla + S_{кв.л} (D-d) \cdot (1 + K_B) = \nabla \left[1 + \frac{S_{кв.л}}{\nabla} (D-d) \cdot (1 + K_B) \right] = \\ &= LBdC_b \left[1 + \frac{C_{wp}}{C_b} \left(\frac{D}{d} - 1 \right) (1 + K_b) \right] \end{aligned} \quad (3.90)$$

Полная теоретическая вместимость проектируемого судна будет равна

$$W_k = (1 + s) LBdC_b \left[1 + \frac{C_{wp}}{C_b} \left(\frac{D}{d} - 1 \right) (1 + K_B) \right]. \quad (3.91)$$

Отметим, формулу (3.91) можно получить, как это делал В.Л. Поздюнин, приняв площади надводных ватерлиний соответствующих параболической строевой (3.85) и разложив S_i в ряд Маклорена, сохранив в нем два первых числа.

Следовательно, вместимость судна зависит

$$W = f\left(L, B, d, \frac{D}{d}, \chi, C_b, K_c, s\right).$$

Из формул (3.90) и (3.91) следует, что полная теоретическая вместимость проектируемого судна увеличивается, при увеличении главных размеров судна. Наиболее сильное влияние на вместимость оказывает от-

клонение $\frac{D}{d}$, так как показатель степени $\frac{D}{d}$ в формуле (3.81) больше единицы. Сильное влияние на вместимость оказывает также коэффициент развития надстроек s , особенно на пассажирских судах. Что же касается изменения коэффициента развития седловатости и погиби бимсов K_c , кубатуру подпалубных помещений обычно трудно использовать для размещения полезных грузов. Коэффициенты C_b и C_{wp} обычно выбираются из соображений остойчивости и ходкости.

Отношение $\frac{D}{d}$ характеризует также запас плавучести судна, оказывает влияние на остойчивость и непотопляемость. Для его определения в первом приближении можно воспользоваться зависимостями, предложенными различными авторами для отдельных типов судов. А.В. Бронников [6] для универсальных сухогрузных судов рекомендует:

– суда длиной более 100 м

$$\frac{D}{d} = (0,63 + 0,41\mu_c) \pm 0,03;$$

– суда длиной менее 100 м (3.92)

$$\frac{D}{d} = (0,56 + 0,40\mu_c) \pm 0,03,$$

где μ_c – удельная грузовместимость судна м³/т по зерновому грузу.

Если судно перевозит генеральный груз μ_z , то отношение $\frac{D}{d}$ должно быть увеличено на 10 – 15%. Если известна удельная грузовместимость по дедвейту μ_{DW} , то $\frac{D}{d}$ может быть определено по формуле

$$\frac{D}{d} = 0,134 + 1,13\mu_{DW} - 0,221\mu_{DW}^2. \quad (3.93)$$

Для комбинированных судов-навалочников Ж.К. Желязков [19] предлагает зависимость

$$\frac{D}{d} = 1,6 - 0,8 \frac{L}{1000}. \quad (3.94)$$

Для наливных судов могут быть рекомендованы формулы

$$\frac{D}{d} = 1,27 + K_{\text{бл}}(2,0K_{\text{бл}} - 0,027) \pm 0,01, \quad (3.95)$$

а также

$$\frac{D}{d} = \frac{C_b}{\eta_{\text{от}}} \left(1,39 \frac{P_{\text{зр}}}{\Delta} + 0,79K_{\text{бл}} \right),$$

где $K_{\text{бл}} = \frac{V_{\text{об}}}{V_{\text{зр}}}$ – коэффициент, отражающий соотношение между объёмом танков изолированного балласта $V_{\text{об}}$ и объёмом грузовых танков $V_{\text{зр}}$; $\eta_{\text{от}}$ – коэффициент использования длины судна L его танковой частью $L_{\text{т}}$, а именно $\eta_{\text{от}} = \frac{L_{\text{т}}}{L}$.

Для лесовозов отношение $\frac{D}{d}$ при осадках по летнюю d и $d_{\text{л}}$ грузовые марки определим [25]

$$\frac{D}{d} = 3,33 \cdot 10^{-3} L + 0,892 \pm 0,05, \quad (3.96)$$

$$\frac{D}{d_{\text{л}}} = 3,33 \cdot 10^{-3} L + 0,892 \pm 0,05.$$

Полученное по приведенным выше формулам отношение $\frac{D}{d}$ должно отвечать условию

$$\left(\frac{D}{d} \right)_{\min} \leq \left(\frac{D}{d} \right)_{\text{проекта}} \leq \left(\frac{D}{d} \right)_{\max}, \quad (3.97)$$

где $\left(\frac{D}{d}\right)_{\min}$ – определяется требованиями Правил Регистра о грузовой марке; $\left(\frac{D}{d}\right)_{\max}$ – определяется требованиями обеспечения необходимой устойчивости проектируемого судна.

Отметим, суда для которых справедливо неравенство

$$\left(\frac{D}{d}\right)_{\text{проекта}} > \left(\frac{D}{d}\right)_{\min} \quad (3.98)$$

называются судами с избыточным надводным бортом.

3.6.3. Уравнение вместимости сухогрузных судов со средним расположением машинного отделения Л.М. Ногида

Рассмотренные уравнения (3.81) и (3.91) полной теоретической вместимости проектируемого судна носят общий характер и применимы для различных типов морских водоизмещающих судов. В то же время для отдельных специализированных судов можно получить более конкретные решения, позволяющие кроме того оценить удифферентовку, объём и расположения балластных цистерн проектируемого судна. Так, Л. М. Ногидом [45] было выведено специальное уравнение вместимости для сухогрузных судов, в основу которого положена грузовместимость (объёмы) грузовых трюмов. Особенно просто это уравнение можно получить для случая если машинное отделение расположено в середине длины судна (рисунок 3.15 и 3.16).

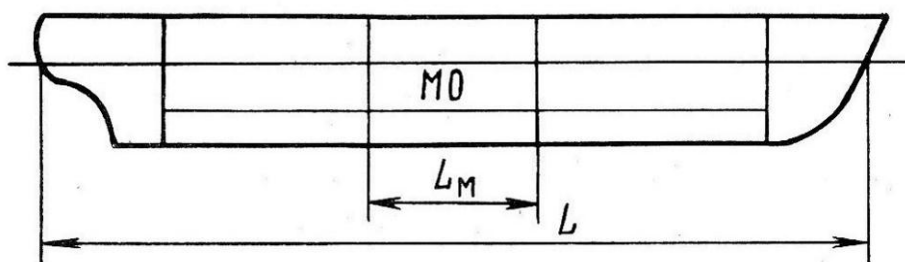


Рисунок 3.15 – Схема сухогрузного судна с МО в средней части

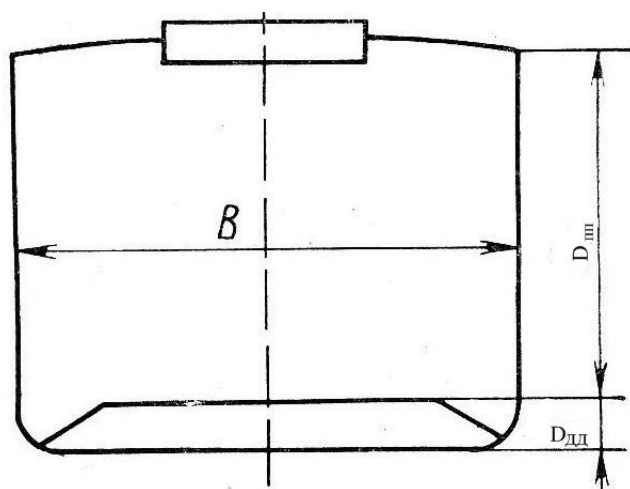


Рисунок 3.16 – Поперечное сечение однопалубного сухогрузного судна

Выполним вывод уравнения вместимости для сухогрузных судов по В. В. Ашику [1]. Обозначим длину машинного отделения (МО) через L_M . Объём, заключенный между открытой палубой и настилом двойного дна

$$W_{III} = LBD_{III} C_{III}, \quad (3.99)$$

где C_{III} – коэффициент полноты теоретического объёма W_{III} , отнесенный к LBD_{III} ; D_{III} – глубина трюма от кромки открытой палубы до настила второго дна.

К объёму W_{III} могут быть добавлены объёмы между комингсами люков, выступающие над открытой палубой. Исключая из объёма W_{III} объёмы пиков, цистерн разного назначения (кроме цистерн расположенных в МО), коридора гребного вала и считая, что исключаемые объёмы составляют величину $(1 - K_{GM}) W_{III}$, получим теоретический объём грузовых помещений и МО в виде

$$W_T = K_{GM} LBD_{III} C_{III}, \quad (3.100)$$

где $K_{\Gamma M}$ – отношение объёма грузовых трюмов и МО к полному подпалубному объёму судна. Этот коэффициент увеличивается в результате учета комингсов люков.

Определим объём машинного отделения, как

$$W_M = L_M B D C_M, \quad (3.101)$$

где C_M – коэффициент полноты МО, включая топливные цистерны в районе МО.

Определим объём грузовых трюмов в виде

$$W_{\Gamma} = W_T - W_M = (K_{\Gamma M} C_{III} - C_M \frac{L_M}{L}) L B D_{III} \quad (3.102)$$

или

$$W_{\Gamma} = (K_{\Gamma M} C_{III} - C_M \frac{L_M}{L}) L B (D - d_{ВД}), \quad (3.103)$$

где $d_{ВД}$ – высота двойного дна.

Итак, уравнение (3.103) позволяет, определив абсолютную грузовместимость сухогрузного судна с МО в средней части судна в функции главных размерений, длины МО L_M и коэффициентов полноты C_{III} и C_M .

Определим удельную грузовместимость судна

$$\mu_{\Gamma} = \frac{W_{\Gamma}}{P_{\Gamma}}, \quad (3.104)$$

где P_{Γ} – грузоподъёмность определим в виде

$$P_{\Gamma} = \eta_{\Gamma} \Delta$$

соответственно

$$\mu_{\Gamma} = \frac{W_{\Gamma}}{\eta_{\Gamma} \Delta}$$

или

$$\mu_{\Gamma} = \frac{W_{\Gamma}}{\eta_{\Gamma} \gamma L B d C_b}, \quad (3.105)$$

а с учётом уравнений (3.103) и (3.105), получим

$$\mu_{\Gamma} = \frac{1}{\eta_{\Gamma} \gamma} \frac{K_{\Gamma M} C_{III} - C_M \frac{L}{L}}{C_b} \left(\frac{D}{d} - \frac{D_{вд}}{d} \right). \quad (3.106)$$

Уравнение (3.106) удельной грузовместимости для сухогрузных судов с МО в средней части по длине судна было получено Л. М. Ногидом [45].

Итак, из уравнений (3.103) и (3.106) следует:

1. Грузовместимость судна меняется пропорционально ширине судна, в тоже время ширина судна не оказывает влияние на удельную грузовместимость.
2. Длина судна оказывает сильное влияние на абсолютную величину грузовместимости, а на удельную грузовместимость оказывает малое влияние.
3. Увеличение высоты борта и отношения $\frac{D}{d}$ вызывает почти прямо пропорциональный рост как абсолютной, так и удельной грузовместимости.
4. Коэффициент общей полноты C_b , с учетом C_{III} и C_M , оказывает малое влияние на удельную грузовместимость.
5. Коэффициент η_{Γ} оказывает обратно пропорциональную зависимость на удельную грузовместимость судна.

3.6.4. Уравнение вместимости для судов с двойными бортами и лесовозов, несущих палубный груз

Для судов с двойными бортами в формулу (3.103) вместо B следует ввести величину $B - 2B_{\phi}$, где B_{ϕ} – средняя ширина бортового отсека (рисунк 3.17).

$$W = (K_{\text{гм}} C_{\text{пш}} - C_{\text{м}} \frac{L_{\text{м}}}{L}) L (B - 2B_{\phi}) (D - D_{\text{вд}}). \quad (3.107)$$

Формула (3.106) в этом случае примет вид [1]

$$\mu_{\text{г}} = \frac{1}{\eta_{\text{г}} \gamma} \frac{K_{\text{гм}} C_{\text{пш}} - C_{\text{м}} \frac{L_{\text{м}}}{L}}{C_{\text{б}}} (1 - 2 \frac{B_{\phi}}{B}) (\frac{D}{d} - \frac{D_{\text{вд}}}{d}). \quad (3.108)$$

При составлении уравнений (3.107) и (3.108) будем считать, что весь груз расположен в трюмах.

Для лесовозов с палубным лесным грузом представим грузовместимость трюмов, как $W_{\text{тр}}$, тогда удельную грузовместимость выразим

$$\mu_{\text{г}} = W_{\text{тр}} (P_{\text{г}} - P_{\text{п}}), \quad (3.109)$$

где $P_{\text{п}}$ – величина палубного груза обычно, принимаемая в долях от $P_{\text{г}}$.

Более точно $P_{\text{п}}$ можно определить через объём палубного груза $nLBD_{\text{п}}$ и его удельный погрузочный объём $\mu_{\text{пг}}$, а именно

$$P_{\text{п}} = \frac{nLBD_{\text{п}}}{\mu_{\text{пг}}}, \quad (3.110)$$

где n – коэффициент, учитывающий долю произведения длины и ширины судна, занятую лесным грузом; $D_{\text{п}}$ – высота штабеля леса, размещенного на палубе.

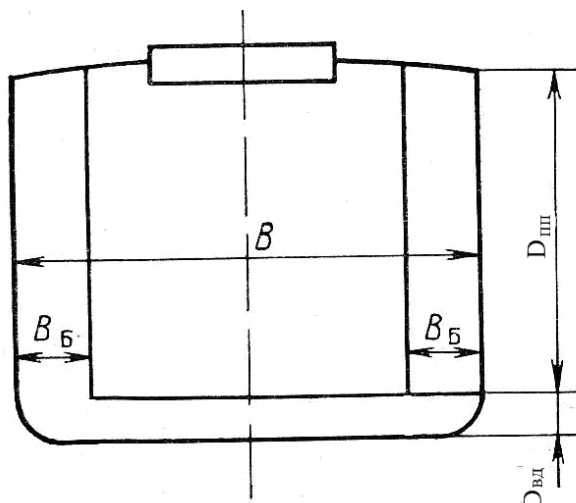


Рисунок 3.17 – Схема поперечного сечения судна с двойными бортами

Таким образом, уравнение удельной грузовместимости примет вид:

$$\mu_r = \frac{W_{\text{тр}}}{P_r - \frac{nLBD_{\text{п}}}{\mu_{\text{пг}}}} = \frac{K_{\text{гм}}C_{\text{шп}} - C_{\text{м}} \frac{L_{\text{м}}}{L}}{\eta_r \gamma C_b - \frac{n}{\mu_{\text{пг}}} \cdot \frac{D_{\text{п}}}{d}} \cdot \left(\frac{D}{d} - \frac{D_{\text{вд}}}{d} \right). \quad (3.111)$$

Отметим, из уравнения (3.111) можно сделать выводы, аналогичные выводам уравнения (3.106).

3.6.5. Уравнение вместимости для сухогрузных судов, с кормовым и промежуточным расположением машинного отделения. Удифферентовка судна

Рассмотренное выше уравнение вместимости для сухогрузных судов со средним расположением машинного отделения не представляет трудностей при удифферентовке судна с полным грузом на ровный киль. Если же машинное отделение имеет кормовое или промежуточное расположение по длине, то при определении вместимости судна необходимо учитывать

возможность удифферентовки судна с полным грузом. Наиболее сложно в этом случае определить L_M и C_M .

Вывод уравнения вместимости выполнен по В. В. Ашику [1].

Допустим приближенно, что удельный объём МО $\mu_M = \frac{W_M}{N_e}$ остаётся

постоянным независимо от расположения МО по длине судна.

В этом случае можно положить, что объём МО

$$W_M = C_M L_M BD_{\text{пп}} \approx C_{\text{мп}} L_{\text{мп}} BD_{\text{пп}} \approx C_{\text{мк}} L_{\text{мк}} BD_{\text{пп}}, \quad (3.112)$$

где индекс «мп» означает промежуточное расположение МО, а индекс «мк» – кормовое.

Соответственно

$$C_M L_M \approx C_{\text{мп}} L_{\text{мп}} \approx C_{\text{мк}} L_{\text{мк}}. \quad (3.113)$$

Из выражения (3.113) следует, что вместимость судов с промежуточным и кормовым расположением МО приближенно можно определить по уравнению (3.103). Но, условия удифферентовки при этом могут внести в решение вопроса о вместимости сухогрузных судов с кормовым и промежуточным расположением МО определенные поправки.

Определим полезную грузовместимость сухогрузного судна с кормовым расположением МО для случая перевозки насыпного груза в виде

$$W_\Gamma = K_\Gamma C_{\text{лп}} L_\Gamma B(D - D_{\text{вд}}), \quad (3.114)$$

где K_Γ – коэффициент заполнения трюмов грузом; $C_{\text{лп}}$ – коэффициент полноты теоретического объёма грузовых помещений; L_Γ – длина грузовых помещений.

Учитывая, что

$$\mu_\Gamma = \frac{W_\Gamma}{P_\Gamma} = \frac{W_\Gamma}{\eta_\Gamma \Delta} = \frac{W_\Gamma}{\eta_\Gamma \gamma L B d C_b},$$

получим

$$\mu_{\Gamma} = \frac{K_{\Gamma}}{\gamma} \cdot \frac{C_{III}}{C_b} \cdot \frac{\eta_{\partial l}}{\eta_{\Gamma}} \cdot \frac{D - D_{\text{вд}}}{d}, \quad (3.115)$$

где $\eta_{\partial l} = \frac{L_{\Gamma}}{L}$ – коэффициент использования длины судна.

Положим, что судно с полным грузом и полными запасами, т.е. при полном водоизмещении Δ , сядет на ровный киль в этом случае уравнение равновесия имеет вид

$$\Delta X_c = \Delta_{np} X_{np} + P_{\Gamma} X_{\Gamma} + P_{\text{T}} X_{\text{T}}, \quad (3.116)$$

где Δ_{np} – сумма масс всех грузов, кроме перевозимого груза и топлива; X_c – абсцисса центра величины, выбираемая по соображениям ходкости; X_{np} – центр тяжести Δ_{np} ; X_{Γ} , X_{T} – абсциссы центра тяжести груза и топлива.

Разделим обе части почленно выражения (3.116) на ΔL

$$\frac{X_c}{L} = \left(1 - \eta_{\Gamma} - \frac{P_{\Gamma}}{\Delta}\right) \frac{X_{np}}{L} + \eta_{\Gamma} \frac{X_{\Gamma}}{L} + \frac{P_{\text{T}}}{\Delta} \frac{X_{\text{T}}}{L}.$$

Принимая ЦТ груза лежащим на половине длины L_{Γ} (рисунок 3.18), обозначая через L_{κ} длину МО с ахтерпиком, а также $X_{\Gamma} = L_{\kappa} + \frac{L_{\Gamma}}{2} - \frac{L}{2}$, получим

$$\frac{X_c}{L} = (1 - \eta_{\Gamma}) \frac{X_{np}}{L} + \eta_{\Gamma} \left(\frac{L_{\kappa}}{L} - \frac{1 - \eta_{\partial l}}{2} \right) + \frac{P_{\text{T}}}{\Delta} \frac{X_{\text{T}} - X_{np}}{L}, \quad (3.117)$$

из формулы (3.117) следует, что

$$\eta_{\partial l} = 1 - 2 \frac{L_{\kappa}}{L} + \frac{2}{\eta_{\Gamma}} \left[\frac{X_c}{L} - (1 - \eta_{\Gamma}) \frac{X_{np}}{L} - \frac{P_{\text{T}}}{\Delta} \frac{X_{\text{T}} - X_{np}}{L} \right]. \quad (3.118)$$

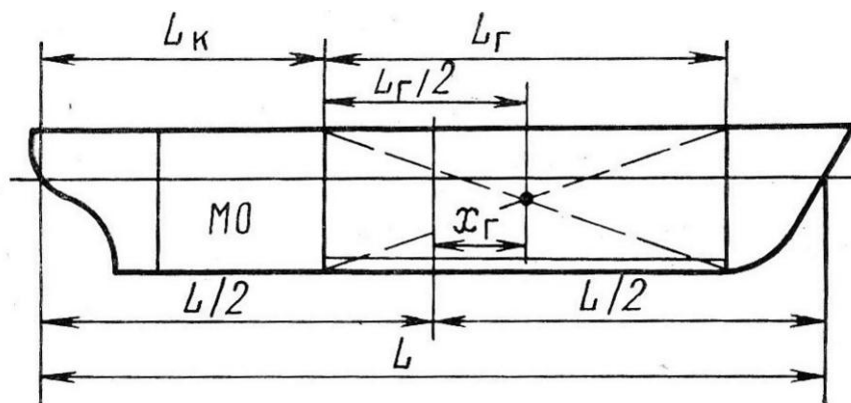


Рисунок 3.18 – Схема сухогрузного судна с кормовым расположением машинного отделения

Определим из формулы (3.115) отношение $\frac{D}{d}$, удовлетворяющее заданной удельной вместимости и условиям посадки судна на ровный киль при полном водоизмещении

$$\frac{D}{d} = \mu_r \frac{\gamma}{K_r} \cdot \frac{C_b}{C_{\text{шт}}} \cdot \frac{\eta_r}{\eta_{\text{ол}}} + \frac{D_{\text{вд}}}{d}. \quad (3.119)$$

Отметим, положительную роль в удифферентовке судна с МО в корме оказывает устройство грузового твиндека в ютовой надстройке.

Для промежуточного расположения МО проектируемого судна уравнения моментов масс относительно теоретического шпангоута в продольном направлении определится (рисунок 3.19).

$$\Delta X_c = (\Delta_{np} - P_m) X_{n\bar{o}} + P_m X_m + P_r X_r + nP_r X_{rn} + (1-n)P_r X_{rk}, \quad (3.120)$$

где $X_{n\bar{o}}$ – исправленная абсцисса ЦТ порожнего судна (в его нагрузке не учитывается масса P_m); X_m , X_{rn} , X_{rk} – абсцисса ЦТ МО и груза, расположенного в носовой и кормовой частях судна; nP_r – масса груза, расположенного в нос от МО.

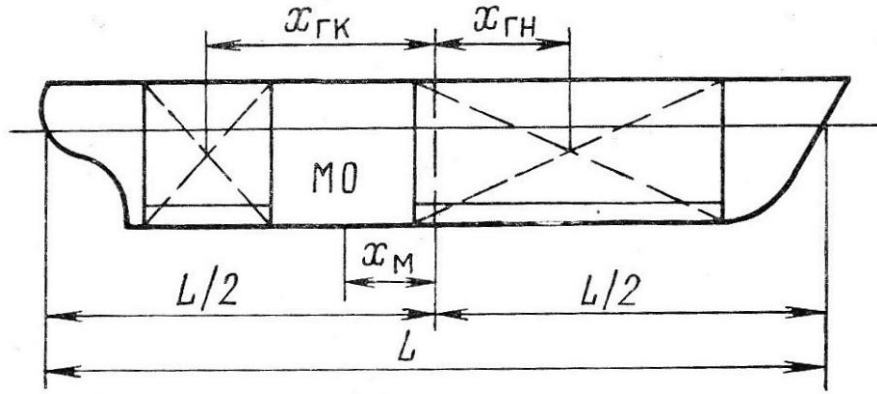


Рисунок 3.19 – Схема сухогрузного судна с промежуточным расположением машинного отделения

Принимая длины носовых и кормовых грузовых помещений пропорционально массе груза, находящегося в них, выразим $L_{ГН} = nL_T$; $L_{ГК} = (1-n)L_T$.

Принимая приближенно ЦТ грузов лежащими посередине длины соответствующего отсека, получим

$$X_{ГН} = X_M + \frac{L_M}{2} + \frac{nL_T}{2};$$

$$X_{ГК} = X_M - \frac{L_M}{2} - \frac{(1-n)L_T}{2}.$$

Соответственно

$$nP_{Г}X_{ГН} = P_{Г}n\left(X_M + \frac{L_M}{2} + \frac{nL_T}{2}\right) \text{ и } (1-n)P_{Г}X_{ГК} = P_{Г}(1-n)\left(X_M - \frac{L_M}{2} - \frac{nL_T}{2}\right).$$

Тогда, с учетом выражения (3.90), после преобразований, получим

$$\frac{X_c}{L} = (1-\eta_r)\frac{X_{нб}}{L} + \frac{P_M}{\Delta}\frac{X_M - X_{нб}}{L} + \frac{P_T}{\Delta}\frac{X_T - X_{нб}}{L} + \eta_r\left(\frac{X_M}{L} + \frac{2n-1}{2}\frac{L_T - L_M}{L}\right). \quad (3.121)$$

Обозначив $\eta_{\partial n} = \frac{L_T}{L}$, найдём

$$\eta_{\partial n} = \frac{1}{\eta_r} \frac{1}{n-0.5} \left[\frac{X_c}{L} - (1-\eta_r)\frac{X_{нб}}{L} - \frac{P_M}{\Delta}\frac{X_M - X_{нб}}{L} - \frac{P_T}{\Delta}\frac{X_T - X_{нб}}{L} - \eta_r\frac{X_M}{L} \right] - \frac{L_M}{L}. \quad (3.122)$$

В ряде случаев появляется необходимость определения небольших изменений полезной грузовместимости грузовых судов. Для этого В.В. Ашик предложил использовать уравнение вместимости в дифференциальной форме.

Воспользуемся уравнением вместимости вида

$$W_{\Gamma} = K_{\Gamma} C_{III} \eta_{\partial L} L B (D - D_{\text{вд}}), \quad (3.123)$$

где принято $L_{\Gamma} = \eta_{\partial L} L$ (уравнение (3.114)).

Определим полный дифференциал W_{Γ} , как

$$\begin{aligned} dW_{\Gamma} &= \frac{\partial W_{\Gamma}}{\partial \eta_{\partial L}} d\eta_{\partial L} + \frac{\partial W_{\Gamma}}{\partial L} dL + \frac{\partial W_{\Gamma}}{\partial B} dB + \frac{\partial W_{\Gamma}}{\partial (D - D_{\text{вд}})} d(D - D_{\text{вд}}) \approx \\ &\approx W_{\Gamma} \left[\frac{d\eta_{\partial L}}{\eta_{\partial L}} + \frac{dL}{L} + \frac{dB}{B} + \frac{d(D - D_{\text{вд}})}{(D - D_{\text{вд}})} \right] \end{aligned} \quad (3.124)$$

где K_{Γ} , C_{III} – считаем как постоянные величины.

Из уравнения (3.124) четко видно влияние $\eta_{\partial L}$, L , B и $(D - D_{\text{вд}})$ на полезную грузовместимость сухогрузного судна с кормовым расположением МО. Отметим, уменьшение коэффициента $\eta_{\partial L}$ (например, из-за условий удифферентовки) можно компенсировать увеличением L , B или $(D - D_{\text{вд}})$.

Уравнение (3.124) может использоваться при совместном решении, например с уравнением И.Г. Бубнова.

3.6.6. Уравнение вместимости для наливных судов

В 1927 – 1930 гг Е.С. Толоцкий опубликовал ряд работ по исследованию вместимости наливных судов с учетом их удифферентовки.

Отметим, современные танкеры, особенно крупных размеров, имеют в своей танковой части не только грузовые, но также балластные и так называемые отстойные отсеки, а так же и двойное дно. Поэтому уравнение

вместимости для наливных судов изложим по В.В. Ашику, с учетом изменений, которые претерпело танкеростроение за последние годы [1].

Объём танковой части определим, как

$$W_T = W_\Gamma + W_{\text{бл}} + W_0, \quad (3.125)$$

где $W_\Gamma = \eta_\Gamma \frac{\Delta}{\gamma_\Gamma}$ – объём грузовых танков; $W_{\text{бл}} = \eta_{\text{бл}} \frac{\Delta}{\gamma_{\text{бл}}}$ – объём балластных танков; $W_0 = cW_\Gamma$ – объём отстойных цистерн; c – доля вместимости отстойных цистерн от цистерн грузовых.

$$W_T = \left[\frac{\eta_\Gamma}{\gamma_\Gamma} (1+c) + \frac{\eta_{\text{бл}}}{\gamma_{\text{бл}}} \right] \gamma_z C_b LBD. \quad (3.126)$$

Исходя из геометрических характеристик, объём грузовых танков определим

$$W_T = C_{\text{III}} (1-\nu) L_T BD, \quad (3.127)$$

где C_{III} – коэффициент полноты танковой части; ν – относительные вычеты на набор (1 – 2 %) и недолив жидкостей (3 – 4 %); L_T – длина танковой части.

Таким образом, приравнивая правые части, получим

$$\frac{D}{d} = \frac{\gamma_B}{(1-\nu)\eta_{\text{дл}}} \left[\frac{\eta_\Gamma}{\gamma_\Gamma} (1+c) + \frac{\eta_{\text{бл}}}{\gamma_{\text{бл}}} \right] \frac{C_b}{C_{\text{III}}}. \quad (3.128)$$

Для *малых танкеров*, у которых нет чисто балластных и отстойных отсеков ($c = 0$; $\eta_{\text{бл}} = 0$), тогда

$$\frac{D}{d} = \frac{\gamma_B}{(1-\nu)\eta_\Gamma} \frac{C_b}{C_{\text{III}}} \frac{\eta_\Gamma}{\eta_{\text{дл}}}. \quad (3.129)$$

Рассматривая (3.128) и (3.129) отметим, что увеличение γ_r и η_r позволяет уменьшить отношение $\frac{D}{d}$ и наоборот, это необходимо учитывать при обеспечении удифферентовки судна с полным грузом на ровный киль.

3.7. Влияние главных размерений и коэффициентов полноты корпуса судна на характеристики баллаستировки и удифферентовки морских судов

3.7.1. Исходные положения

Балластировка судов выполняется для обеспечения требуемой нормами Регистра остойчивости, а также надлежащей посадки судна в процессе его эксплуатации.

Морские транспортные суда, как указывает А.В. Бронников [6], проектируют, как правило, так, чтобы в полном грузу (100% груза и 100% запасов), т.е. при расчетном проектном водоизмещении, они имели необходимую остойчивость и посадку «на ровный киль» или с минимальным дифферентом на корму.

Выбранные параметры остойчивости и посадки, обеспечиваются при этом без приема на судно балласта как твердого, так и жидкого. Исключения составляют суда с относительно высоким расположением центра тяжести – пассажирские, контейнеровозы, лесовозы и некоторые другие. Создавая новые рыбопромысловые суда, как указывает Н.Б.Севастьянов [58], проектант сталкивается с рядом трудностей, которые ограничивают выбор главных размерений при повышенных требованиях к остойчивости и не позволяют развивать палубную механизацию, рыбоперерабатывающую технику и применять наиболее производительные орудия лова. Поэтому в состав нагрузки часто заранее включают твердый балласт. На эксплуатируемых судах увеличение остойчивости при переоборудовании или ремонте обычно достигается за счет приема твердого балласта. Количество твердого

балласта, принимаемого на рыбопромысловые суда при постройке или дальнейшей эксплуатации весьма различно (см. таблицу 3.12), по данным [58].

Отметим, приём твердого балласта на судно позволяет при проектировании снизить обычно ширину судна, что часто дает положительный эффект, особенно для быстроходных и среднескоростных водоизмещающих судов, позволяя снизить мощность главного двигателя. Однако, при обосновании этой задачи требуется достаточно сложные технико-экономические обоснования, желательно с использованием модельных испытаний в опытовом бассейне.

Таблица 3.12 – Количество постоянного твердого балласта на некоторых морских судах

Название судна, главные размерения $L \times B \times D$, м	Страна	Архитектурный тип	$\Delta_{\max, T}$	$\Delta_{\text{нор}}, T$	$P_{\delta, T}$	$\frac{P_{\delta}}{\Delta_{\text{нор}}} \cdot 100\%$
Branca de Neve 21.9×5.0×1.95	Португалия	Деревянный гладкопалубный сейнер с рубкой на миделе	58	36	2,0	5,6
Nova Cura 21.0×5.4×2.55	Голландия	Стальной траулер с баком и рубкой	93	83	7,0	8,4
Alfred 21.0×6.0×3.00	Бельгия	Стальной кормовой траулер с удлиненным баком	96	76	25,0	33,0
Cornelies Pieter 23.7×5.82×2.87	Голландия	Стальной траулер бортового траления с коротким баком и рубкой	135	120	9,0	7,5
Мотобот 19,0×5,44×2,85	СССР	Композитный мотобот с рубкой в корму от миделя	8	63	8,0	12,7
Алмаз 24,0×5,2×2,80	СССР	Пассажирское судно прибрежного плавания Черноморского бассейна	105	87	18,3	21,0
Аркадия 21,0×4,4×2,10	СССР	Пассажирское судно прибрежного плавания Черноморского бассейна	54	44	5,4	12,3
Нахимовец 24,2×5,2×2,80	СССР	Пассажирское судно прибрежного плавания Черноморского бассейна	111	94	18,0	19,1
N2 23.0×6.7×3.60	Швеция	Стальной траулер с баком и рубкой	215	118	4,6	3,9
Rostock 24.0×4.7×1.70	ГДР	Буксирный катер	66	52	10,0	19,2
Kofuku Maru № 58 31.6×5.7×2.60	Япония	Стальной траулер с баком и рубкой на миделе	248	135	5,0	3,7
Mare Librum 29.0×6.5×3.37	Голландия	Стальной траулер бортового траления с коротким баком и рубкой в корме	265	236	20,0	8,5
БМРТ 75.0×13.6×10.0	СССР	Двухпалубное стальное судно со слипом в корме и средней надстройкой	3669	2340	220	9,4

Продолжение таблицы 3.12						
РТМ «Тропик» 71.6×13.2×9.5	СССР	Однопалубное, стальное с удлинённым баком и средней надстройкой, корма транцевая со слипом	3020	2169	130	6,0
Cape Kennedy 69.0×11.1×7.47	Англия	Стальной кормовой траулер, средняя надстройка, переходящей в рубку	1670	1110	160	14,4
Chuyo Maru №7 43.7×8.1×3.89	Япония	Стальной кормовой траулер с баком, заходящий за мидель	750	415	15	3,6
Reykjaborg 34.0×7.7×3.80	Исландия	Стальной кошелевый сейнер с баком и ютом	657	272	45	16,6
Jorundur RE-299 31.7×7.62×3.66	Исландия	Стальной кошелевый сейнер с баком и ютом	565	259	41	15,8
Taikei Maru № 23 38.12×7.80×3.6	Япония	Стальной сейнер с баком и рубкой на миделе	544	362	14	3,9
Keflvikingur 29.6×7.20×3.80	Исландия	Стальной бортовой траулер с баком и ютом	520	245	44	18,0
CPT 34.79×7.3×3.48	СССР	Однопалубный стальной средний рыболовный траулер, надстройка в корме	450	288	20	7,0
Arhao II 33.6×7.32×4.19	США	Деревянный бортовой траулер с баком и рубкой в корме	417	292	30	10,3
№1 26.9×6.6×3.30	Швеция	Стальной траулер с баком и рубкой	271	150	10	6,7

3.7.2. Рациональные границы баллаستирования судна с целью повышения начальной остойчивости

Как указывалось, опыт проектирования судов показывает, что часто, особенно у малых морских судов, остойчивость пытаются повысить за счет приема на судно твердого балласта.

Данный вопрос достаточно подробно рассмотрен в книге «Проектирование судов внутреннего плавания» [17].

Допустим в первом приближении, что в пределах изменения осадки судна, оседаемого в результате приёма балласта, борта можно считать прямо стенными. Метacentрическая высота в этом случае будет равна

$$h = h_0 + \frac{P_{\sigma}}{\Delta + P_{\sigma}} \cdot \left[d + \frac{\delta d}{2} - h_0 - z_{\sigma} \right], \quad (3.130)$$

где h_0 – метacentрическая высота судна до приёма балласта, м; P_{σ} – вес принятого балласта, кН; Δ – водоизмещение судна до приёма балласта,

кН; d – осадка судна до приёма балласта, м; δd – приращение осадки за счёт приёма балласта, м; z_{δ} – отстояние центра тяжести балласта от основной линии, м.

Твёрдый балласт обычно располагают в прикильной части судна, соответственно для него приближенно можно считать $z_0 = 0$. Обычно, даже для малых морских судов вес твёрдого балласта составляет не более 5 – 7% от водоизмещения судна порожнем, поэтому приближенно можно принять $\frac{\delta d}{2} = 0$.

Положительное приращение метацентрической высоты за счёт приёма твёрдого балласта может быть достигнуто, если $d + \frac{\delta d}{2} - h_0 - z_{\delta} > 0$, или с учетом сказанного выше $d - h_0 > 0$, или $d > h_0$, т.е. когда балласт принят ниже горизонтальной плоскости А-А, отстоящей на величину $d - h_0$ от основной линии (см. рисунок 3.20 а). Из того же рисунка следует, что если $d > h_0$, то приём балласта в часть судна, расположенную ниже плоскости А-А, даёт положительный эффект, который тем значительнее, чем ближе центр тяжести балласта к основной линии. При расположении центра тяжести балласта на уровне плоскости А-А эффект равен нулю. При $d < h_0$ положительный эффект от приёма балласта мог бы иметь место в том случае, если бы твёрдый балласт был принят в районе, расположенном ниже основной плоскости (см. рисунок 3.20 б).

При приёме жидкого балласта величинами h_{δ} , а в отдельных случаях и $\frac{\delta d}{2}$ в уравнении пренебрегать нельзя

$$h_{\delta\delta} = h_0 + \frac{P}{\Delta + P} \cdot \left[d + \frac{\delta d}{2} - h_0 - h_{\delta} \right]. \quad (3.131)$$

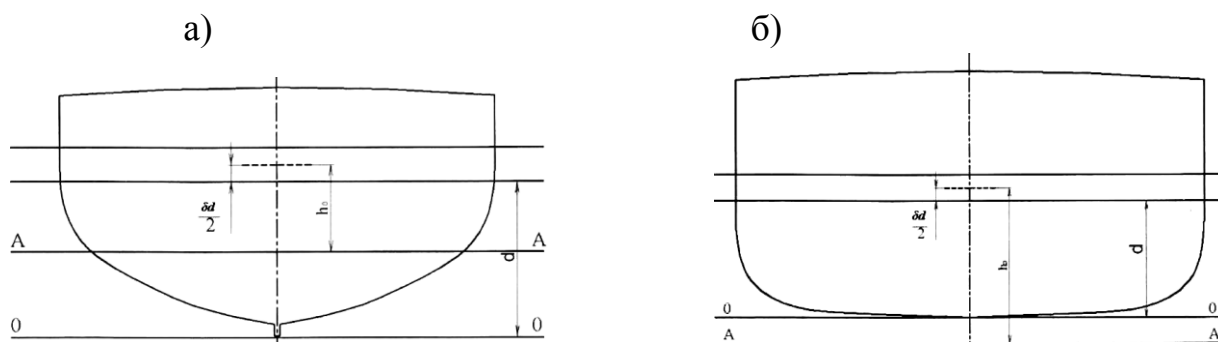


Рисунок 3.20 – Положение предельной плоскости

Вследствие этого условие, необходимое для положительного приращения метацентрической высоты при приёме жидкого балласта, выразится неравенством $d + \frac{\delta d}{2} - h_0 > h_0$.

Следует подчеркнуть, что при приёме балласта некоторое положительное приращение восстанавливающего момента (в зоне малых углов крена) будет иметь место не только за счет увеличения h_0 , но и за счет возрастания водоизмещения в результате приёма балласта.

На основании сказанного отметим, что при $d > h_0$ приём балласт всегда положительно влияет на остойчивость. Это случай характерен для морских судов, а также для малоостойчивых винтовых пассажирских теплоходов пригородных линий на внутренних водных путях. Если $d < h_0$, то приём балласта даёт ничтожный положительный эффект, а иногда даже вреден (например, для мелкосидящих судов с большими значениями $\frac{B}{d}$).

3.7.3. Баллаستировка судов для регулирования их остойчивости и посадки

Подчеркнём, жидкий балласт, в виде забортной воды, принимается при эксплуатации практически всеми крупными морскими судами. Поэто-

му при дальнейшем рассмотрении баллаستировки судов будем иметь в виду прием на судно только жидкого балласта.

Сама операция приема жидкого балласта выполняется экипажем судна. Проектантов же при разработке проекта судна интересует вопрос о необходимом количестве и размещении водяного балласта принимаемого на судно, а следовательно, вопрос определения объёма (вместимости) и расположения балластных цистерн.

Водяной балласт принимают для повышения остойчивости судна в случае, когда израсходованы судовые запасы топлива и воды, а также на специализированных судах при перевозке тяжелых палубных грузов. Водяной балласт, кроме того, принимают для снижения остойчивости для случаев нагрузки судна – при ходе с запасами топлива и воды, но без груза. В зависимости от этого балласт принимают либо в низкорасположенные цистерны, либо, наоборот, в высокорасположенные цистерны. Отметим, размещение водяного балласта, потребного для понижения центра тяжести судна, практически не вызывает трудностей. В этом случае, обычно используют балластные цистерны, образованные корпусными конструкциями, а также пустые грузовые или топливные цистерны и отсеки двойного дна, показанные на рисунке 3.21.

Прием балласта с целью повышения центра тяжести судна требует создания специально разработанных подпалубных или высоко расположенных бортовых цистерн, показанных на рисунке 3.22.

Отметим, что наибольший эффект в этом случае достигается при расположении балластных цистерн выше верхней палубы (см. рисунок 3.21 а). В качестве примера, в таблице 3.13 приведены характеристики остойчивости и осадки двух сухогрузных судов (см. рисунок 3.21) при различных состояниях нагрузки.

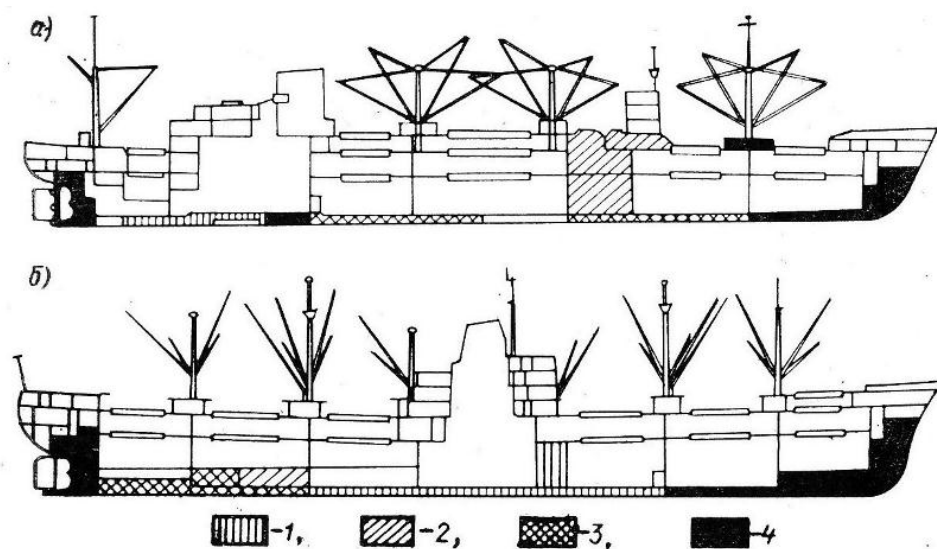


Рисунок 3.21 – Размещение отсеков для судовых запасов и водяного балласта на сухогрузных судах

а) дедвейтом 10500 т и б) дедвейтом 13000 т.

1 – топливо, вода, масло; 2 – груз или водяной балласт; 3 – топливо или водяной балласт; 4 – водяной балласт

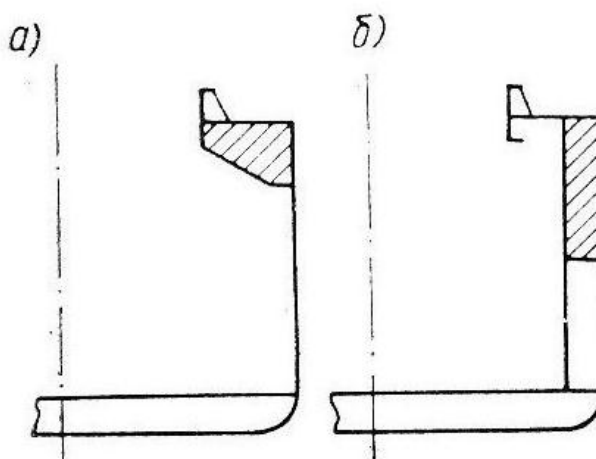


Рисунок 3.22 – Высокорасположенные балластные цистерны:

а) подпалубная; б) бортовая

Прием водяного балласта для изменения посадки судна производится в самых разнообразных условиях эксплуатации судов.

Таблица 3.13 – Остойчивость и осадка двух сухогрузных судов при различных состояниях нагрузки

Состояние нагрузки	Судно А			Судно В		
	Средняя осадка, м	Метацентрическая высота, h		Средняя осадка, м	Метацентрическая высота, h	
		м	%		м	%
<i>С генеральным грузом</i> Выход в рейс со 100% запасов	8,48	0,43	100	8,048	0,69	100
Прибытие в порт назначения с остатками запасов и балластом	8,25	0,38	88	7,87	0,24	35
<i>С зерновым грузом</i> Выход в рейс со 50% запасов (судно А) и со 100 % (судно В)	8,63	0,52	121	9,7	1,15	167
Прибытие в порт назначения с остатками запасов и балластом	-	-	-	9,01	0,56	81
В балласте со 100% запасов	5,43	0,55	128	5,14	2,31	335

Как указывалось выше, при проектировании судов проектант стремится для случая наибольшего водоизмещения (для транспортных судов 100% груза и 100% судовых запасов) обеспечить посадку судна «на ровный киль», или с минимальным дифферентом на корму. В течение рейса, по мере расходования судовых запасов, а так же сдачи перевозимого груза, посадка судна может претерпевать значительные изменения, поэтому проектант должен проанализировать наиболее характерные состояния нагрузки, включая варианты, изложенные в Правилах Регистра. Изменения первоначальной посадки судна, при этом, может привести к недопустимому ухудшению его мореходных качеств. Поэтому для придания судну необходимой посадки обычно используется балластировка судна путем приема водяного балласта.

3.7.4. Требования к посадке судов в полном грузу и при ходе в балласте

Дифферент судна влияет как на ходкость, так и на маневренные качества судна, а также на остойчивость и заливаемость.

Напомним, теоретический чертеж судна обычно проектируется при посадке судна «на ровный киль». Поэтому всякое изменение дифферента равносильно изменению формы обводов корпуса судна. Так при увеличении дифферента на корму увеличивается полнота обводов и заостряется носовая оконечность, а при увеличении дифферента на нос – наоборот. Дифферент судна на нос, как правило, сопряжен с потерей скорости хода, особенно при ходе судна на взволнованном море.

Увеличение дифферента судна на корму по существу увеличивает площадь кормового дейдвуда и соответственно ухудшает устойчивость судна на курсе, а при значительном дифференте на нос – существенно увеличивается рыскливость. В общем случае влияние небольшого дифферента на поперечную остойчивость судна невелико. Посадка судна с дифферентом на корму сказывается положительно при плавании на взволнованном море, так как улучшается всхожесть судна на волну и сухость палубы. Посадка судна с дифферентом на нос при встречном волнении ухудшает всхожесть судна на волну, судно начинает зарываться носом, появляются ударные нагрузки и судно начинает принимать много воды на палубу. На рисунке 3.23 показано поведение судов, имеющих различную удифферентовку. Снимки выполнены при 6-ти бальном волнении в Японском море.

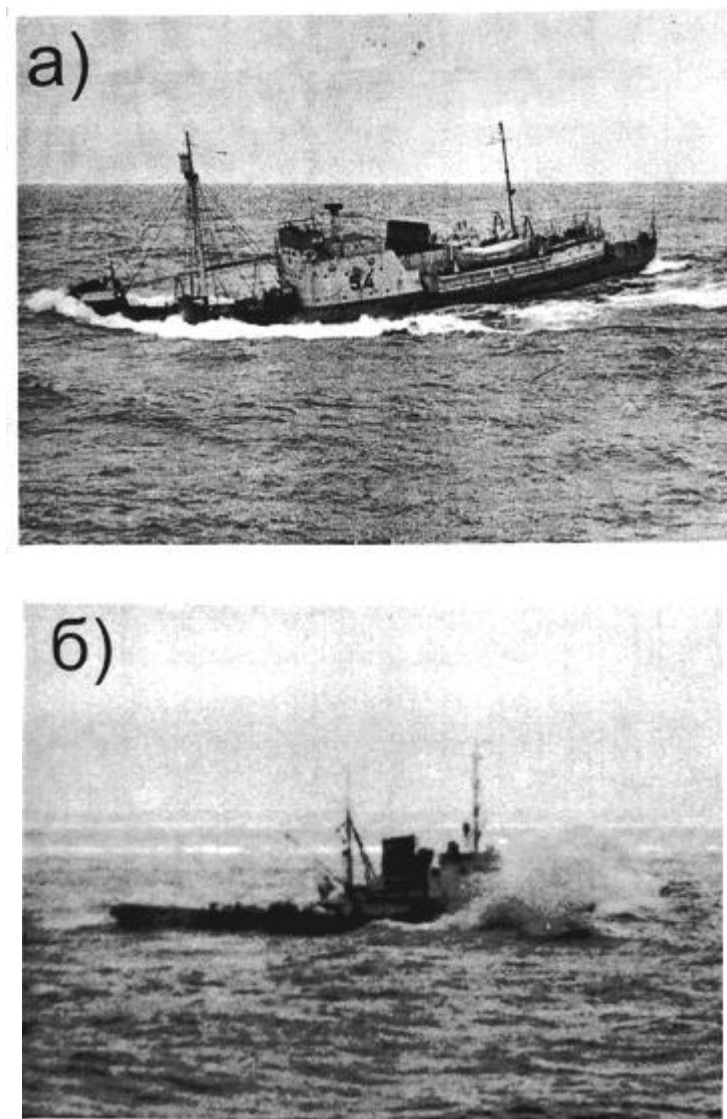


Рисунок 3.23 – Поведение судов на взволнованном море:

а) китобойное судно типа «Мирный», имеющее дифферент на корму;

б) сейнер РС-618 типа «СО», имеющий дифферент на нос

Возникающие при этом ударные нагрузки могут привести к повреждению днища судна в районе носовой оконечности. Это явление характеризуется сдвигом по фазе между изменением волнового профиля и вертикальным перемещением носовой оконечности судна при килевой качке. Если этот сдвиг равен нулю, то носовая оконечность поднимается и опускается при килевой качке вместе с взволнованной поверхностью воды. При этом опасность заливаемости и слеминга будет минимальной. Для того,

чтобы обеспечить хорошую всхожесть на волну и уменьшить слеминг, нужно чтобы основные массы судна были сосредоточены по возможности ближе к миделю, а оконечности облегчены, т.е. нужно стремиться к тому, чтобы радиус инерции массы судна относительно поперечной центральной оси судна был минимальным.

$$R_y \approx \sqrt{\sum \frac{P_i}{\Delta} (x_i - x_g)^2} \rightarrow \min. \quad (3.132)$$

При $R_y > 0,25L$ всхожесть на волну резко ухудшается, а слеминг увеличивается [59].

Погружение оконечностей судна зависит как от средней осадки, так и дифферента. Так при килевой качке уменьшение погружения носовой оконечности судна приводит к оголению днища и соответственно к ударам в носовую часть днища встречной волной. Уменьшение же погружения кормовой оконечности судна при килевой качке в свою очередь приводит к оголению гребного винта, т.е. к снижению его эффективности работы.

В общем случае нормирование погружения оконечностей обеспечивает необходимую среднюю осадку судна, но для высокобортных судов, особенно с сильно развитыми надстройками, это может оказаться недостаточным и тогда, для предотвращения чрезмерного ветрового сноса, приходится дополнительно принимать водяной балласт. В первую очередь это относится к судам, плавающим в условиях ограниченной свободы для маневрирования.

На рисунке 3.24 приведён график ветробойности K_ϕ для сухогрузных и наливных судов при плавании в полном грузу.

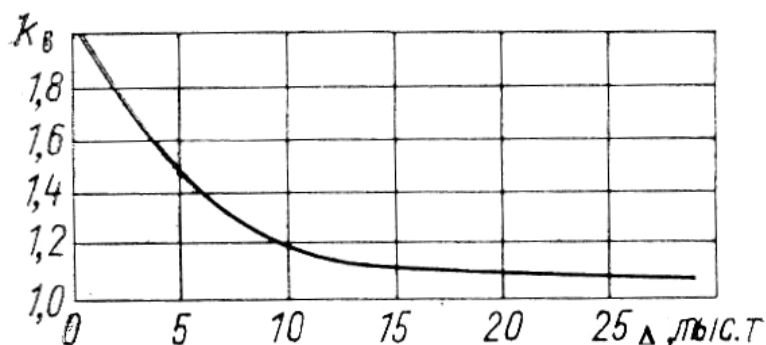


Рисунок 3.24 – Верхний предел значений коэффициента ветробойности K_v , характерных для сухогрузных и наливных судов

Отметим, коэффициент ветробойности K_v определяется как

$$K_v = \frac{S_{\Pi}}{S_{\text{ДП}}}, \quad (3.133)$$

где S_{Π} – площадь парусности, м^2 ; $S_{\text{ДП}}$ – площадь подводной части диаметральной плоскости судна, м^2 .

Обычно, у танкеров, за исключением малотоннажных и газовозов, значение K_v при ходе в полном грузу бывает менее единицы.

При определении минимально допустимого погружения носовой оконечности судна, главным образом, анализируется вероятность появления слеминга, т.е. ударных нагрузок корпуса о встречные волны. Днищевой слеминг (отметим, существует также и бортовой слеминг) появляется при оголении днища в носовой оконечности судна и последующем его входе в воду с вертикальной скоростью, превышающей пороговую скорость.

Отметим, в балластном пробеге обычно суда дифферентуются на корму и в этом случае гидродинамические моменты и давления, при прочих равных условиях, зависят от относительной осадки $a_n = \frac{d_n}{L}$. На рисунке 3.25 представлен график, показывающий влияние a_n на ударные гидродинамические силы и моменты, выраженные через напряжения $\sigma_n = f(a_n)$,

где σ_n – напряжения в носовой оконечности модели судна, замеренные во время испытаний.

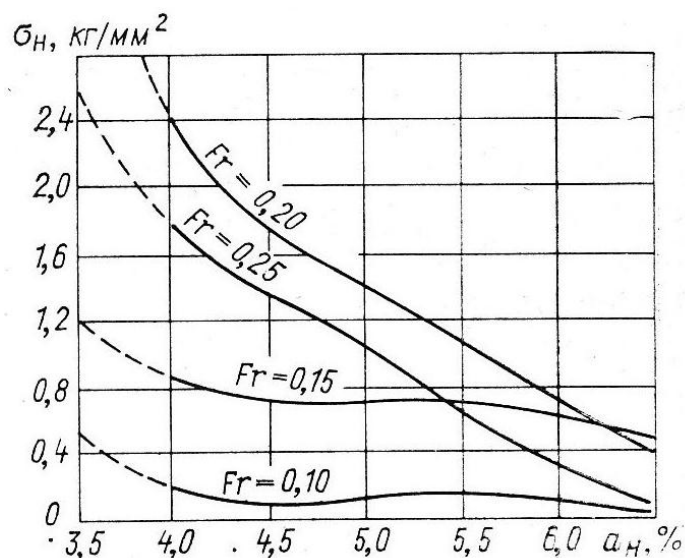


Рисунок 3.25 – Влияние относительной осадки носовой оконечности a_n модели судна на напряжения σ_n , вызываемые ударным действием гидродинамических сил

Испытания модели судна проводились в диапазоне относительных скоростей $Fr = 0,15 - 0,25$, характерных для современных судов. На графике видно, что по мере уменьшения относительной осадки a_n ударные гидродинамические нагрузки непрерывно растут, причем тем интенсивнее, чем меньше a_n . Эта закономерность, в основном, справедлива и для натуральных судов, плавающих на морском нерегулярном волнении.

Вопрос о минимально допустимой осадки в носу, позволяющей избежать слеминг без существенного снижения скорости хода, наиболее просто можно решить путем увеличения относительной осадки носовой оконечности корпуса судна, что приведет к увеличению размеров и строительной стоимости судна. В настоящее время, из опыта эксплуатации, принято считать *нижний предел допустимой относительной осадки судна в носу* $a_n = 0,025 - 0,030$, большие значения – для быстроходных судов и

судов, плавающих в ограниченных акваториях. Для судов, выполняющих длительные рейсы в штормовых условиях, рекомендуется увеличивать относительную осадку носом до $a_n = 0,035 - 0,038$.

Отметим, если при проектировании судна достижение рекомендованных значений a_n затруднено, то целесообразно использовать в носу выраженные V-образные обводы, снижающие интенсивность ударов днища о воду. С увеличением размеров судов обычно уменьшаются относительные скорости Fr судов, что позволяет соответственно уменьшить a_n (см. рисунок 3.25).

Осадка кормовой оконечности судна d_k характеризует степень погружения гребного винта и, следовательно, эффективность его работы. Чем ближе верхняя кромка диска гребного винта подходит к свободной поверхности воды, особенно если оголяется верхняя кромка диска гребного винта, тем больше падение коэффициента полезного действия гребного винта, а следовательно и его упора. Кроме того, периодическое оголение лопастей гребного винта на качке приводит к резкому изменению частоты вращения гребного вала и винта, к повышению динамических нагрузок на главный двигатель, а также может вызвать вибрацию кормовой оконечности судна. Следовательно, для обеспечения необходимого погружения гребного винта судна следует установить соответствующую осадку кормой d_k , при которой достигается удовлетворительные (в отношении ходкости) результаты работы гребного винта. Относительный диаметр гребного винта у одновальных транспортных судов обычно лежит в пределах $\frac{d_g}{d_{zp}} = 0,65 - 0,70$, где d_g – диаметр гребного винта, d_{zp} – осадка судна в полном грузу. В этом случае осадка судна кормой d_k , с учетом требований Правил Регистра по зазору между винтом и корпусом, а также толщины подошвы ахтерштевня у судов с кормой закрытого типа, определяется

$$d_k \geq (0,70 - 0,74) d_{ep}. \quad (3.134)$$

Большие значения d_k соответствуют судам с малооборотными дизелями и прямой передачей мощности на гребной винт, а меньшие значения d_k соответствуют судам с винтами повышенной оборотности и меньшим диаметром винта.

Отметим, в случае штормовой погоды и длительных рейсов рекомендуется увеличивать погружения кормовой оконечности вплоть до $0,8d_{ep}$.

3.8. Контрольные вопросы:

1. Дифференциальное уравнение И.Г. Бубнова.
2. Дифференциальное уравнение плавучести.
3. Дифференциальное уравнение весов.
4. В чем заключается статический метод выбора главных размерений малых морских судов.
5. Основные соотношения для выбора главных размерений и коэффициентов полноты корпуса проектируемого судна.
6. Выбор относительной длины проектируемого судна.
8. Выбор коэффициентов полноты корпуса проектируемого судна.
9. Объяснить влияние главных размерений и коэффициентов полноты корпуса на характеристики начальной остойчивости проектируемого судна.
10. Поперечная метацентрическая высота как характеристика остойчивости судна.
11. Уравнение начальной остойчивости в алгебраической форме.
12. Уравнение начальной остойчивости в дифференциальной форме.
13. Уравнение начальной остойчивости при аффинных преобразованиях теоретического чертежа.

14. Уравнение начальной остойчивости при использовании метода приведения судна-прототипа к геометрическому подобию.

15. Рациональные границы баллаستировки судна с целью повышения начальной остойчивости.

16. Каково влияние главных размерений и коэффициентов полноты корпуса на характеристики диаграммы статической остойчивости проектируемого судна?

3.9. Основные термины и понятия

Относительная длина проектируемого судна	Начальная остойчивость
Уравнение начальной остойчивости	Балластировка судна

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учебное пособие "Основы проектирования судов и плавучих сооружений". Часть 1. «Определение основных элементов и главных размерений проектируемого судна» позволяет студентам специальности "Кораблестроение и океанотехника" изучить общие методы проектирование судов, приемы выбора архитектурно-конструктивного типа морского судна, методы определения основных элементов и главных размерений судна. В пособии рассмотрены влияние главных размерений и коэффициентов полноты корпуса на характеристики диаграммы статической остойчивости, вместимости, баллаستировки и удифферентовки проектируемого судна, требования к посадке судов в полном грузу и при ходе в балласте.

Настоящее издание может быть полезно студентам специальности 7.05120101 – Корабли и океанотехника при выполнении курсового проекта по дисциплине "Основы проектирования судов и плавучих сооружений", а также при дипломном проектировании и разработке выпускных работ магистров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ашик В.В. Проектирование судов / В.В. Ашик – Изд. 2-е перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1985. – 318 с.
2. Барановский М.Е. Суда для перевозки навалочных грузов/ М.Е. Барановский. – Л.: Судостроение, 1967. – 256 с.
3. Безбородов В.Г. Суда космической службы / В.Г. Безбородов, А.М. Жаков. – Л.: Судостроение, 1980. – 246 с.
4. Богданов Б.В. Буксирные суда (проектирование и конструкция) / Б.В. Богданов, А.В. Слуцкий, М.Г. Шмаков, К.А. Васильев, Д.Х. Соркин. – Л.: Судостроение, 1974 – 280 с.
5. Бондурянский З.П. Морские железобетонные суда / З.П. Бондурянский, М.А. Дьячков, Э.Е. Меламед. – Л.: Судостроение, 1966. – 200 с.
6. Бронников А.В. Морские транспортные суда / А.В. Бронников. – Л.: Судостроение, 1984. – 352 с.
7. Бронников А.В. Определение основных элементов морских грузовых судов: учебное пособие / А.В. Бронников. – Л.: ЛКИ, 1983. – 83 с.
8. Бронников А.В. Проектирование судов / А.В. Бронников. – Л.: Судостроение, 1991. – 320 с.
9. Бубнов И.Г. Об одном методе определения главных размерений проектируемого судна. Избранные труды / И.Г. Бубнов. – Л.: Судпромгиз, 1956. – 439 с.
10. Будницкий Ю. А. Морские пассажирские суда/ Ю.А. Будницкий, А.Г. Чувакин, В.С. Петухов. – Л.: Судостроение, 1985. – 264 с.
11. Воеводин Н.Ф. Основы проектирования универсальных плавучих кранов/ Н.Ф. Воеводин. – «Речфлот», 1950 – 362 с.
12. Войткунский Я.И. Справочник по теории корабля / Я.И. Войткунский. – Л.: Судостроение, 1985. – Т. 1. – 320 с.
13. Войткунский Я.И. Справочник по теории корабля. Пер. с англ. / Я.И. Войткунский. – Л.: Судостроение, 1985. – Т. 2. – 440 с.
14. Гернер Г. Проектирование и оборудование торговых судов. Пер. с нем. / Г. Гернер, Р. Ферховсек. – М.: Морской транспорт, 1960 – 323 с.
15. Гурович А.Н. Проектирование спасательных и пожарных судов / А.Н. Гурович, А.А. Родионов. – Л.: Судостроение, 1971. – 284 с.
16. Дмитриев А.Н. Проектирование подводных аппаратов/ А.Н. Дмитриев. – Л.: Судостроение, 1978 – 237 с.
17. Дормидонтов Н.К. Проектирование судов внутреннего плавания/ Н.К. Дормидонтов, [и др.]. – Л.: Судостроение, 1974. – 335 с.
18. Доусон Т. Проектирование сооружений морского шельфа / Т. Доусон. – Л.: Судостроение, 1986 – 286 с.
19. Желязков Ж.К. Комбинированные суда для перевозки нефти и навалочных грузов / Ж.К. Желязков. – Л.: Судостроение, 1976. – 198 с.

20. Зайцев В.В. Проектирование общесудовых устройств / В.В. Зайцев [и др.]. – Николаев: УГМТУ; "Илион", 2004. – 300 с.
21. Зайцев В.В. Суда-газовозы / В.В. Зайцев, Ю.Н. Коробанов. – Л.: Судостроение, 1990. – 301 с.
22. Зайчик К.С. Морские рыбопромышленные суда / К.С. Зайчик, Г.Б. Терентьев – Л.: Судостроение, 1968. – 236 с.
23. Гилмер Томас К. Проектирование современного корабля/ Томас К. Гилмер. – Л.: Судостроение, 1984. – 376 с.
24. Державні санітарні правила для морських суден України. ДСП 7. 7. 4 – 057 – 2000 – К.: Міністерство охорони здоров'я України, 2000. – 98с.
25. Захаров Б.Н. Суда для перевозки лесных грузов / Б.Н. Захаров – Л.: Судостроение, 1988. – 208 с.
26. Захаров Б.Н. Морские лесовозы / Б.Н. Захаров, В.К. Смирнов – Л.: Судостроение, 1967. – 227 с.
27. Каменский Е.В. Рыболовные траулеры / Е.В. Каменский, Г.Б. Терентьев – Л.: Судостроение, 1968. – 303 с.
28. Каменский Е.В. Траулеры и сейнеры / Е.В. Каменский, Г.Б. Терентьев, – Л.: Судостроение, 1978. – 215 с..
29. Капустин К.Я. Плавучие буровые установки и буровые суда. – «Недра», 1974 – 240с.
30. Кротов О. І. Проектування малотоннажних суден: Навчальний посібник/ О. І. Кротов, В. І. Голіков, О. Ю. Єганов, О.В. Бондаренко. – Миколаїв: УДМТУ, 2003. – 190 с.
31. Кротов О. І. Проектування морських транспортних суден / О. І. Кротов, В. І. Голіков, О. Ю. Єганов, О.В. Бондаренко. – Миколаїв: УДМТУ, 2003. – 152 с.
32. Кузьмина А.В. Основы художественного конструирования судов:научно-метод. пособие /А.В. Кузьмина. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2009. – 184 с.; ил.
33. Леви Б.З. Пассажирские суда прибрежного плавания / Б.З. Леви. – Л.: Судостроение, 1975. – 320 с.
34. Линдблад А. Проектирование обводов транспортных судов / А. Линдблад. – Л.: Судостроение, 1965. – 127 с.
35. Логачев С.И. Морские танкеры / С.И. Логачев. – Л.: Судостроение, 1970. – 360 с.
36. Логачев С.И. Суда для перевозки сжиженных газов / С.И. Логачев, М.М. Николаев. – Л.: Судостроение, 1966. – 259 с.
37. Манинг Д.Ч. Теория и техника проектирования кораблей. Пер. с англ./ Д.Ч. Манинг. – М.: Воениздат, 1960. – 292 с.
38. Медведев Н.Ф. Суда для исследования мирового океана / Н.Ф. Медведев – Л.: Судостроение, 1971. – 315 с.

39. Мирошниченко И. П. Морские сухогрузные суда открытого типа/ И. П. Мирошниченко. – М.: Морской транспорт, 1962. – 219 с.
40. Мирошниченко И. П. Быстроходные грузовые лайнеры / И.П. Мирошниченко, И. П. Лимонов. – Л.: Судостроение, 1969. – 280 с.
41. Некрасов В.А. Вероятностные задачи мореходности судов / В.А. Некрасов. – Л.: Судостроение, 1978. – 300 с.
42. Некрасов В.А. Современные проблемы обеспечения безопасности судов при их проектировании/ В.А. Некрасов// Безопасность мореплавания и ее обеспечение при проектировании и постройке судов: матер. междунар. науч.-техн. конф. БМС-2004. – Николаев, 2004. – С. 9 – 11.
43. Некрасов В.А. Комплексная критериальная оценка эффективности и безопасности судов/ В.А. Некрасов// УДМТУ: сб. науч. тр. – Николаев. – 2003. – №6 (392). – С. 10 – 21.
44. Новиков А.И. Океанотехника прошлого и настоящего/ А.И. Новиков, В.А. Андреев, Ю.Д. Федотов. – Севастополь, 2007. – 256 с.
45. Ногид Л.М. Теория проектирования судов. Учебник для кораблестроительных вузов и факультетов / Л.М. Ногид. – Л.: Судпромгиз, 1955. – 480 с.
46. Ногид Л.М. Проектирование морских судов / Л.М. Ногид. – Л.: Судостроение, 1976. – 206 с.
47. Ногид Л.М. Проектирование формы судна и построение теоретического чертежа/ Л.М. Ногид. – Л.: Судостроение, 1981. – 243 с.
48. Павленко Г.Е. Сопротивление воды движению судов / Г.Е. Павленко. – М.: Водтранспортиздат, 1953. – 382 с.
49. Павлюченко Ю. Н. Основы художественного конструирования судов: учебн. пособ. для студ. Вузов/ Ю. Н. Павлюченко. – Л.: Судостроение, 1985. – 264 с.
50. Пашин В.М. Оптимизация судов / В.М. Пашин. – Л. Судостроение, 1976. – 296 с.
51. Поздюнин В.Л. Теория проектирования судов. Определение основных элементов проектируемого судна в первом приближении / В.Л. Поздюнин. – Л: ЛКИ, 1938. – Вып. 1. – 50 с.
52. Поздюнин В.Л. Теория проектирования судов. Определение главных размерений проектируемого судна / В.Л. Поздюнин. – Л: ЛКИ, 1939. – Вып. 2. – 97 с.
53. Правила классификации и постройки морских судов. Российский морской регистр судоходства. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2008 г.–Т.1.–502 с.
54. Правила класифікації та побудови морських суден в 4 томах/ Регістр судноплавства України – Київ, 2004. Т1 – 69 с., Т2 – 318 с., Т3 – 204 с., Т4 – 261 с.
55. Раков А.И. Особенности проектирования промысловых судов / А.И. Раков. – Л.: Судостроение, 1966. – 144 с.

56. Раков А. И. Определение плеча остойчивости формы на ранних стадиях проектирования судна / А. И. Раков, А.Я. Чапичева // Судостроение. – 1983. – №6. – С.14 – 15.
57. Раков А.И. Оптимизация основных характеристик и элементов промысловых судов / А.И. Раков. – Л.: Судостроение, 1978. – 231 с.
58. Раков А.И. Проектирование промысловых судов / А. И. Раков, А.Б. Севастьянов. – Л.: Судостроение, 1981. – 243 с.
59. Родионов Н.Н. Современные танкеры / Н.Н. Родионов. – Л.: Судостроение, 1980. – 284 с.
60. Сидорченко В.Ф. Суда-спасатели и их служба / В.Ф. Сидорченко. – Л.: Судостроение, 1983. – 240 с.
61. Труб М.С. Промысловые плавучие базы / М.С. Труб. – Л. Судостроение, 1972. – 232 с.
62. Урбанович В. Архитектура судов / В. Урбанович. – Л.: Судостроение, 1969. – 352 с.
63. Холоша В.И. Проектирование и эксплуатация сухогрузных судов / В.И. Холоша. – Л.: Судостроение, 1984. – 216 с.
64. Худяков Л.Ю. Исследовательское проектирование кораблей / Л.Ю. Худяков. – Л.: Судостроение, 1980 – 239 с.
65. Цудани Г. Японские промысловые суда. Пер. с англ. / Г. Цудани. – Л. Судостроение, 1982. – 142 с.
66. Шостак В.П. Эффективность техники освоения океана / В.П. Шостак. – К: Наукова думка, 2002. – 319 с.
67. Analysis of UK Fishing Vessel Safety 1992 to 2006, Marine Accident Investigation Branch Carlton House Carlton Place Southampton United Kingdom SO15 2DZ, November 2008. – 106 p.
68. Construction Vessel of the World. Incorporating Diving Support of the World. Sixth Edition. 2002. Oilfield Publication Limited. PO Box 11, Ledbury Herefordshire HR8 1BN, England.
69. Eyres D.J. Ship Construction/ D.J. Eyres. – Bakes and Taylor (USA), 2000. – 147 p.
70. Mantari J. L. Intact stability of fishing vessels under operational loading conditions / J. L. Mantari, S. Ribeiro E Silva, C. Guedes Soares // 13th Congress of Intl. Maritime Assoc. of Mediterranean IMAM - 2009, Istanbul, Turkey, 12-15 Oct. 2009. – С. 185 – 193.
71. Tupper E.C. Basic Ship Theory / E.C. Tupper. – Elsevier Sciences Technology, 2001. – 789 p.

Навчальний посібник

Раков Олексій Іванович
Душко Вероніка Ростиславівна
Кузьміна Ганна Валентинівна
Жибоедов Вячеслав Володимирович

**«ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДЕН И ПЛАВУЧИХ СПОРУД»
ЧАСТИНА 1. ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ І
ГОЛОВНИХ РОЗМІРЕНЬ ПРОЕКТОВАНОГО СУДНА
(російською мовою)**

Учебное пособие

Раков Алексей Иванович
Душко Вероника Ростиславовна
Кузьмина Анна Валентиновна
Жибоедов Вячеслав Владимирович

**«ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДОВ И
ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ»
ЧАСТЬ 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
И ГЛАВНЫХ РАЗМЕРЕНИЙ ПРОЕКТИРУЕМОГО СУДНА**

Коректор Л.П. Светлих
Нормоконтролер Г.М. Персідський
Комп'ютерний набір і верстка В.Р. Душко

Здано в набір 15.12.2012 Підп. до друку 16.08.2013 К № 1272 від 16.08.2013.
Формат 60×90/16. Пап. тип. № 1. Офсет. друк. Ум. друк. арк. 14,38.
Тираж 100 прим. Зам. № 190.

Видавництво СевНТУ, м. Севастополь-53, вул. Університетська, 33, НМЦ,
т. (0692) 435-210
E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua ; nms@sevgtu.sebastopol.ua