Поисковые исследования штормовой мореходности корабля

История эволюционного развития инженерно-технических решений об обводах и архитектуре корабля, о единении морских наук и хорошей морской практики

Василий Николаевич Храмушин, *выпускник судоводительского отделения Калининградского мореходного училища, с плавцензом штормового плавания в Атлантическом и Тихом океанах, удостоен штурманского звания во Владивостоке. Хорошая морская практика привела на кафедру гидромеханики Ленинградского кораблестроительного института, в науки о непротиворечивом проектировании корабля.*

Поисковые исследования штормовой мореходности корабля

История эволюционного развития инженерно-технических решений об обводах и архитектуре корабля, о единении морских наук и хорошей морской практики

***Храмушин В.Н**. подсекция мореходных качеств судов в штормовых условиях, Российского научно-инженерного общества судостроителей им. А.Н. Крылова. г. Южно-Сахалинск, 2018.*

В книге рассматриваются вопросы выбора обводов корпуса и внешней архитектуры корабля с позиций наилучшей штормовой мореходности и безопасности в сложных условиях плавания. Проектирование океанского корабля, являющегося сложным инженерным сооружением, требует всестороннего изучения множества технологических и эксплуатационных факторов. Совместное использование исторического опыта хорошей морской практики, аналитических и экспериментальных исследований позволило определить непротиворечивые подходы к оптимизации основных элементов формы корпуса и общекорабельной архитектуры, и согласовать принципиальные технические решения для достижения наилучшей мореходности некоторых классов кораблей и судов.

Эти вопросы последовательно обсуждаются в книге в форме технико-исторического анализа мореходности, физико-геометрического представления о корабельном волнообразовании и взаимодействии корпуса с морским волнением, с последующей интерпретацией сравнительных экспериментов с опытовыми моделями гипотетических и перспективных проектов кораблей и судов. Комплексный подход к рассмотрению вопросов морского инженерного дела позволил дополнить настоящее исследование материалами о гидротехнических особенностях гаваней морских портов, а также о вовлечении творческой молодежи к освоению морских наук.

Изложение материалов ведется в краткой форме, достаточной для повторения и проверки основных результатов расчетов и экспериментов. Книга представляет интерес для судоводителей, корабельных инженеров, студентов морских институтов и всех интересующихся историей флота, мореходностью корабля и вопросами проектирования формы корпуса и общекорабельной архитектуры.

Проектирование океанского корабля, являющегося сложным инженерным сооружением, требует всестороннего изучения множества технологических и эксплуатационных факторов. Совместное использование исторического опыта хорошей морской практики, аналитических и экспериментальных наук в области корабельной гидромеханики, позволило лишь коснуться непротиворечивых подходов к достижению наилучшей мореходности некоторых классов кораблей и судов. Новые проектные построения последовательно обсуждаются в книге в форме технико-исторического анализа мореходности, физико-геометрического представления о корабельном волнообразовании и взаимодействии корпуса с морским волнением, с последующей интерпретацией сравнительных экспериментов с опытовыми моделями гипотетических и перспективных проектов кораблей и судов. Комплексный подход к рассмотрению вопросов морского инженерного дела позволил дополнить настоящее исследование материалами о гидротехнических особенностях гаваней морских портов, а также о вовлечении творческой молодежи к освоению морских наук. Изложение ведется в краткой форме, достаточной для поверки основных результатов и воплощения всех проектных решений.

© ***Храмушин В.Н.*** 1975÷1979– *Калининградское мореходное училище*
1980÷1986– *Ленинградский кораблестроительный институт*
1983÷2005– *Дальневосточный политехнический институт*
1987÷2018– *Сахалин, Научно-инженерное общество судостроителей им. А. Н. Крылова*

Содержание

Предисловие *9*
Введение *11*

I. История кораблестроения как поиск непротиворечивого диалога с океаном **17**

Древние инженерные решения по мореходности судна *23*
Штормовой режим плавания лагом к волне 27
Активное штормование с ходом по волне 32
Режим пассивного штормования носом на волну 36
Новое становление средиземноморского флота *40*
Флот Великих географических открытий 45
Расцвет парусного флота и переход к механическому движению . *56*
Создание нового Российского флота в конце XIX века *64*
О гидродинамических особенностях кораблей конца XIX – начала XX веков 68
О современных проектных решениях *82*
Предварительные предложения по корабельной архитектуре *94*
Новые показательные кораблестроительные решения *100*

II. Береговая инфраструктура и условия штормового мореходства **105**

Российский Дальний Восток 119
Практика штормового мореплавания **126**
Штормовые случаи *129*
Гидродинамические условия штормового плавания *139*
Классификация морских волн 140
Построение модели волнового поля на основе реальных наблюдений в штормовом море. *146*
Групповая структура трохоидальных штормовых волн и зыби в открытом море 150
Навигационный комплекс контроля состояния моря, атмосферы и мореходности корабля *158*
О морском экспериментальном полигоне для проектных и мореходных изысканий в штормовом море **164**
Бортовые счетно-решающие комплексы и штурманские базы знаний 165
Сахалинский опытовый полигон для мореходных испытаний судов и штормовых экспериментов в открытом море 167
Заключение о Сахалинской региональной морской научной школе . 172
Морское инженерное дело **173**
Экспедиционное районирование побережья острова Сахалин *175*
Гидродинамические особенности проявления длинноволновой динамики моря вблизи побережья. *178*
Оценка собственных длинноволновых колебаний уровня *181*

Гидродинамические особенности Холмского морского торгового порта *185*
Численное моделирование резонансных колебаний уровня моря на акватории Холмского порта 189
Автономные гидрофизические модули *193*
Обзор современных средств морской робототехники 197
Технические особенности построения сверхмалого корабля 199
Оптимальные проекты сверхмалых кораблей различного назначения 203

III. Проектные особенности корабля повышенной штормовой мореходности 206

Теоретическое изучение волновых процессов 206
Основные обозначения и соотношения кинематики корабельных волн *209*
Плоская модель поперечных волн 211
Особенности расходящихся корабельных волн 214
Теория волнового сопротивления Мичелла *217*
Волнообразующий потенциал 218
Граничные условия и интегральное преобразование Фурье 221
Описание единичного волнообразующего источника 223
Описание корабельного волнообразования 225
Основные свойства волнового поля 227
Формула Мичелла для волнового сопротивления *229*
Вычислительная модель на основе интеграла Мичелла 233
Условие образования свободных волн 236
Группировка волн в разрушающиеся гребни 240
Численная реализация расчетов волнового сопротивления *243*
Интеграл по ватерлиниям 244
Интегрирование результатов расчета по ватерлиниям 245
Интеграл по волновому спектру, расчет сопротивления 247
Математические модели формы корпуса и оценочные расчеты волнового сопротивления 248
Представление формы корпуса для расчетов на ЭВМ 249
“Параболические” (степенные) обводы 251
Асимметричный относительно мидель-шпангоута корпус 253
Моделирование уменьшенной площади ватерлинии 256
Форштевень 258
Ахтерштевень 259
Примеры построения аналитических корпусов *260*
Основные выводы об использовании численных решений *264*

IV. Проработка перспективных проектов кораблей повышенной мореходности 267
О постановке задачи непротиворечивого проектирования 270
Испытания моделей в Калининградском мореходном училище 278
Рекогносцировочные оценки мореходности малой модели МИДВ ... 280
Построение опытовой модели МИДВ 284
Особенности гидростатики и остойчивости 291
Параметры ходкости на спокойной воде и на волнении 293
Сравнительные опытовые эксперименты 297
Цель экспериментальных исследований 297
Программа и условия ходовых и мореходных испытаний 298
Сопоставление ходкости модели МИДВ с моделями традиционных судов 301
Ходкость на волнении в зависимости от тяги движителей 303
Оценка ускорений в оконечностях моделей по отношению к динамике жидкости в гребне волны 305
Анализ выполнения проектных требований к модели с малой инерцией действующей ватерлинии 307
1. Ходовые испытания на тихой воде 307
2. Ходовые испытания на волнении 309
3. Наблюдения за свободным плаванием модели МИДВ на волнении 310
Выявленные недостатки в проекте формы корпуса модели МИДВ .. 314
Стабилизация корпуса на волнении 315
Историческое заключение для новых перспективных проектов кораблей и судов 317
Безопасность штормового плавания и общие вопросы хорошей мореходности 319
Согласование элементов формы корпуса и общекорабельной архитектуры для достижения эффективности и безопасности штормового плавания 321
Предназначение корабля обеспечивается его мореходными качествами в сложных и штормовых условиях плавания 321
1. Режим штормового хода навстречу и по волне 323
2. Активный ход вразрез штормовой волне 326
3. Аварийное плавание или особые режимы хода лагом к волне 327
Ключевые проектные решения для достижения наилучшей мореходности: эффективности и безопасности штормового плавания 328
Корабль без бортовой качки на волнении 330
Корабль без килевой качки на ходу на волнении 332
Корабль, остойчивый в штормовом плавании 334
Надводный борт и верхняя палуба корабля 342

«Форштевень и скула корабля» ... 346
«Ахтерштевень и кормовой подзор корабля» ... 351
Корабль с плавниковым движителем ... 356
Активный стабилизатор килевой и бортовой качки корабля – штормовой аварийный движитель ... 359
Завершенные проекты перспективных кораблей и судов для дальневосточных морей России ... 363
1. Быстроходный корабль – корвет (патрульно-гидрографическое судно) ... 368
2. Универсальное транспортное судно ... 378
3. Океанский спасатель, научно-исследовательское судно ... 385
4. Варианты рыболовных траулеров ... 393
5. Пассажирское судно ... 407
Каботажное пассажирское судно Сахалино-Курильского края ... 411
Заключительные замечания о достижениях эволюционно-обоснованного проектирования новых кораблей и судов ... 420

V. Морское дело и научно-техническое творчество юношества . 424

О традициях развития морского и корабельного дела ... 426
Особенности судомодельного спорта в России ... 430
Участие сахалинских школьников в опытовых испытаниях моделей судов ... 433
Об исторической морской практике в литературе ... 440
Морские и кораблестроительные термины ... 446
Шкала степени волнения на море ... 457
ЛИТЕРАТУРА ... 459
Историческая ... 459
Вопросы проектирования и технической эксплуатации флота ... 462
Теоретические вопросы кораблестроения и гидромеханики ... 464
Патенты и заявки на изобретения ... 467

Памяти Учителя
профессора кафедры теории корабля
Александра Николаевича Холодилина
посвящается

Предисловие

Авторами настоящего технико-исторического исследования по праву должно называть многих русских моряков и корабельных инженеров, искренне дорожащих своей причастностью к реальному морскому делу, к независимой жизни в единении и согласии с океанской стихией. Будь то морской ценз дальних плаваний или «плавали – знаем» океанских научных экспедиций, но именно такое жизненное богатство приводит людей к безусловному признанию древних морских законов, к почитанию неписаного опыта морских наставников и всей многовековой истории мореплавания. О штормах и хороших кораблях на море бытует единое мнение – корабль живет только в согласии с морем.

Морское и корабельное дело, заложившее основы почти всех точных, инженерных и естественных наук, традиционно востребует технические решения за горизонтами непознанного, вновь и вновь осознавая значимость «хорошей морской практики» в проектировании новых кораблей, при прокладке новых штормовых морских маршрутов. Море безгранично, как и все науки в нем обретающиеся. Однако смысловой контекст «палубных баек» подчас не менее глубок и многозначен, нежели физико-математические изыскания при оптимизации и проектировании корабельных обводов, в обустройстве морских портов и прибрежной навигационной инфраструктуры.

В настоящем исследовании целесообразно воспользоваться поверенными хорошей морской практикой шедеврами кораблестроения эпохи становления океанского мореходства, когда непротиворечивое проектирование и единение корабля со штормовой стихией доверялось исключительно авторитетным мореплавателям. На этом пути

можно выявить главные режимы штормового плавания корабля; означить рекомендации штурману по выбору курса и скорости для эффективного решения поставленных задач в любых: сложных, штормовых и ледовых условиях плавания; и, как следствие, путем сравнения выявить ключевые элементы формы корпуса и общекорабельной архитектуры для нового перспективного корабля, наилучшим образом отвечающем его предназначению.

В книге осознанно собраны воедино исторические факты о древнем мореходстве, экспериментальные результаты опытовых испытаний и математические подходы к проектированию добротной формы корпуса и общекорабельной архитектуры всепогодного океанского судна. Освещая многогранность морского научно-технического творчества, формулируются и обосновываются разнообразные проектно-технические решения по судовым обводам и общекорабельной архитектуре судов для особых географических условий эксплуатации. На пути единения научного поиска в особых навигационных условиях мореплавания, при учете текущего состояния региональной морской инженерной инфраструктуры, проектно-оптимизационная задача функционально замыкается жесткими требованиями по достижению эффективности морских работ в особо тяжелых штормовых и ледовых условиях дальневосточных морей России. При этом, постановка, реализация и контроль проектных изысканий привносит инженерные достижения из фундаментальных наук и хорошей морской практики, одновременно ограничивая разнообразие инженерно-технических новаций вне предназначения будущего перспективного корабля.

География исследований и опытовых экспериментов в штормовом море, в том числе проведенных при участии моряков-наставников и активных мореплавателей, обширна. Это г. Сызрань – Волжское водохранилище; г. Калининград – Атлантический океан; г. Владивосток – Тихий океан; г. Ленинград – опытовый бассейн кафедры теории корабля Корабелки; г. Южно-Сахалинск – Охотское море и Татарский пролив; г. Комсомольск-на-Амуре – опытовый бассейн Технического университета, г. Санкт-Петербург – суперкомпьютерные технологии.

Введение

Морское дело и развитие морской инфраструктуры являются важнейшими показателями эффективности использования наукоемких технологий, общегеографических знаний и созидательного творчества морских инженеров и авторитетных мореплавателей, при которых хорошая морская практика исключает возможность «изобретательства без пользы для реального морского дела».

Многовековая эволюция кораблестроения, воплощая инженерно-технические достижения исторических эпох, предвосхищает прогресс технологического и научно-технического развития, оставляя в истории наилучшие образцы морской техники. Технико-исторический анализ мореходных качеств океанского флота позволяет проследить оптимальность инженерных решений в судостроении прошлых веков, не оставлявших «на борту красивого корабля ничего лишнего».

Эволюционное развитие морской техники связано с освоением новых технологий в промышленности, востребованных сопутствующим становлением морских инженерных наук и хорошей морской практики. Проектирование добротных кораблей и судов начинается с освоения азов искусства судовождения и практического учета навигационных особенностей океанского и прибрежного плавания, согласование которых закладывает основу эксплуатационной эффективности флота.

Современный флот, как правило, имеет фундаментальное преимущество перед средневековыми кораблями и старинными пароходами, выражающееся в избыточном запасе мощности главных двигателей. Надежная работа машин позволяет активно маневрировать для предотвращения жестких захватов корпуса штормовой волной, а при неизбежном возникновении опасных коллизий, уверенно восстанавливать выбранный режим движения: вновь и вновь достигая заданной ходкости, или оптимизируя курс и скорость для умерения штормовой качки. В то же время, избыток мощности двигателей имеет следствием повышенный расход топлива на дальних переходах по тихому морю.

Навигационно-гидрографические условия дальневосточных морей России не изобилуют разнообразием. Важнейшим требованием к флоту является достижение всепогодности морских работ и транспортных коммуникаций в штормовых и ледовых условиях, на большом удалении от портов убежищ. В такой постановке проблемы для достижения реальной эффективности морских работ и морских коммуникаций требуется обязательное и ответственное участие авторитетных дальневосточных мореплавателей в проектировании нового транспортного и рыболовного флота, что ранее представлялось естественным для мореходов времен великих географических открытий, и поныне служит единению инженерных наук и реальной морской практики.

Инициаторами изучения штормовой мореходности корабля в середине 70-х гг. стали наставники судоводительского отделения Калининградского мореходного училища Александр Алексеевич Камышев и Григорий Степанович Маленко, означившие преимущества кораблей конца XIX – начала XX веков. Их наука судовождения оперировала знаниями инженерной гидромеханики для уверенного маневрирования корабля, включая ежедневные швартовки судов в открытом море в сложных и штормовых условиях плавания, что естественным образом сводилось к обоснованиям значимых предложений по усовершенствования формы корпуса и общекорабельной архитектуры для новых перспективных кораблей и судов различного назначения. Первые же сравнительные эксперименты с опытовыми моделями, построенными по наставлениям авторитетных учителей-мореходов на основе известных прототипов исторических кораблей и судов, наглядно показали разительное превосходство их мореходных качеств как на тихой воде, так и в условиях интенсивного волнения.

Ключевые подходы к достижению наилучшей штормовой мореходности найдены в наставлениях палубной команды учебного парусного судна[1] «Крузенштерн»; в практических уроках и доброжелатель-

[1] УПС «Крузенштерн» в 1975 г. в Балтийском отряде учебных судов, п. Рига.

ных дискуссиях о реальной морской практике на ходовых вахтах калининградских ПТР[1] «Трудолюбивый» и РТМС[2] «Багратионовск; в черноморских походах севастопольского поискового судна «Зайнула Мустакимов», в том числе с подводным аппаратом «Бентос»; в реальной работе на владивостокских рыболовных судах БМРТ[3] «Посейдон» и СРТМК[4] «Зайнула Мустакимов», где новые проектные идеи уже поверялись практикой судовождения в условиях тяжелых тихоокеанских штормов 1983-1984 гг. По инициативе профессора кафедры теории корабля А. Н. Холодилина в 1985-1986 гг проведено экспериментальное изучение тихоокеанских проектных новаций в мореходном опытовом бассейне кафедры теории корабля Ленинградского кораблестроительного института (ныне СПбГМТУ).

Важной целью проектных поисков представлялась задача минимизации внешнего силового воздействия крупных морских волн на корпус корабля в различных режимах плавания на интенсивном волнении, а главным и неожиданным результатом стало экспериментальное обнаружение возможности гидродинамической компенсации штормовых кренящих и дифферентующих сил, о которых упоминал ещё Владимир Полиéвктович Костенко по результатам экспериментирования на броненосце «Орёл», и по его наблюдениям за штормовым маневрированием кораблей 2-й Тихоокеанской эскадры Зиновия Петровича Рожественского.

Уменьшение килевой и бортовой качки, как и ожидалось, сопровождается улучшением ходкости модели гипотетического корабля в условиях интенсивного волнения, что в первую очередь подтверждает высокий уровень компетентности морских инженеров прошлого.

Теоретические поиски и обоснование экспериментальных результатов выполнялось под научным руководством профессора Александра Николаевича Шебалова. В предположении возможности суще-

---

[1] ПТР – производственный транспортный рефрижератор.
[2] РТМС – рыболовный траулер морозильный – супер.
[3] БМРТ – большой морозильный рыболовный траулер
[4] СРТМК – средний рыболовный траулер морозильный, кормового траления.

ствования принципа обратимости в решении интеграла Джона Генри Мичелла о волновом сопротивлении корабля, анализировался интервал интегрирования, определяющий силовое воздействие штормовых волн на корпус корабля. Это вело к поиску решений по оптимизации судовых обводов, в которых обосновывалась необходимость минимизации ходового дифферента и корабельного волнообразования на всех, включая закритически высокие скорости хода на тихой воде, что послужит желаемому уменьшению силовых нагрузок на корпус корабля при его встрече с теоретически соизмеримыми по длине штормовыми волнами. Серия простых поверочных расчетов волнового сопротивления для обводов исторических судов вполне соответствовала ожидаемым предположениям, которые затем подтверждались результатами экспериментальных мореходных исследований в опытовом бассейне.

Важнейшим циклом морских изысканий, инициированных и проведенных при активном участии профессора Александра Николаевича Холодилина, стал технико-исторический анализ штормовых мореходных качеств наиболее известных и добротных кораблей и судов, построенных до начала XX века. Обнаружение эволюционных процессов в истории кораблестроения, гармонично связывающих развитие морского инженерного дела и расширение географии океанского мореплавания, впоследствии создали особый аналитический базис для всех новых проектно-технических изысканий в области штормовой мореходности перспективных кораблей и судов.

Удивительными открытиями сказалась практика штормового маневрирования на пресноводном волжском водохранилище, где до настоящего времени используются широкобортные лодки с высокими штевнями, преемники крупных и прочных поморских лодий на севере России и арабских шебек открытого океана. Корпус речных лодок адаптирован к гидромеханике крупных девятых валов, и позволяет держать ход лагом к волне с минимальной опасностью заливаемости. Развал скул жестко демпфирует удары волн, усиливает килевую качку и силовые нагрузки на корпус, что важно для удержания борта над мечущейся поверхностью крупных трохоидальных волн, и, по услови-

ям прочности корпуса – столь активные режимы штормового маневрирования – недопустимы в проектах крупных морских судов.

Эпоха великих географических открытий охарактеризована появлением парусных океанских кораблей, способных к длительному штормованию на курсе носом на волну с предельно минимальными силовыми нагрузками на корпус корабля под ударами штормовых волн и ураганных ветров. Устойчивость на штормовом курсе и плавность качки объясняется завалом надводного борта, высокой транцевой кормой, очень полным и низким носом корабля. Последующая эволюция кораблестроения естественным образом связывается с оптимизацией новых технических решений для достижения хорошей штормовой ходкости под парусами, затем – под механическими двигателями.

Множество интереснейших проектных решений в истории кораблестроения актуальны для современной морской практики, могут и должны быть использованы для развития мореходства и морских работ на Дальнем Востоке.

В 1998 году морские исследования проводились под началом Михаила Львовича Красного, при поддержке американских компаний «SAIC» и «Евразия». В 2000 г. при активном участии профессора Дальневосточного государственного технического университета Сергея Владимировича Антоненко выполнены проектные изыскания по госзаказу Главного управления кораблестроения России. В активных дискуссиях и в соавторстве с капитаном I ранга, профессором Военно-морского инженерного института Сергеем Ивановичем Кроленко, к 2004 созданы и обоснованы пять концептуальных проектов кораблей и судов повышенной штормовой мореходности, специально оптимизированных для эксплуатации в сложных, ледовых и штормовых условиях Сахалина и Курильских островов. Это *патрульно-гидрографический корабль*, способный к активному несению службы в любых погодных условия; *спасательное – научно-исследовательское судно*, оптимизированное для уверенного маневрирования в условиях ураганных штормов; *рыболовный траулер*, позволяющий вести палубные работы на интенсивном волнении моря; *универсальное транс-*

портное судно с предельно минимизированной бортовой и килевой качкой; *пассажирское судно*, способное к безопасному штормованию при аварийной остановке двигателей.

Самоходные телеуправляемые модели первых четырех проектов прошли мореходные испытания в открытом море и в опытовом бассейне Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Превосходные мореходные качества исторических проектов кораблей и судов подтверждаются безусловно. Основные инженерные решения и ключевые результаты испытаний в настоящее время представляются в интернет на морском портале Сахалинского отделения и подсекции мореходных качеств судов в штормовых условиях НТО Крылова: www.ShipDesign.ru.

Среди новых разработок 2017 года обосновываются проектные решения по вариантам среднетоннажных пассажирских судов для регулярных линий Сахалина и Курильских островов. Многие инженерные решения повсеместно внедряются в зарубежной кораблестроительной практике, в проектах кораблей и судов самого различного назначения.

I. История кораблестроения как поиск непротиворечивого диалога с океаном

Не без основания можно полагать, что первые человеческие поселения образовались на берегах рек, озер и морских гаваней, а водные пути стали первыми транспортными магистралями для строительства бытовой инфраструктуры и организации общественных взаимоотношений между народами. Искусство кораблестроения во многом отображает, а иногда предвосхищает уровень развития цивилизации, ярко показывая высокий уровень развития науки, естествознания и техники.

Романтика моря обязательно увлекает наиболее активную творческую молодежь, стремящуюся к освоению всего комплекса сложных морских наук и приумножающую авторитет корабелов и легендарную славу мореплавателей. Постройка кораблей всегда опиралась на весь арсенал наук и ремесел, на опыт профессионалов и техническое искусство инженеров, в свою очередь отражавших стиль жизни, мировоззрение людей и их общие устремления.

Реальные возможности прибрежных стран по освоению морских пространств являются главным критерием экономической мощи и политической роли государства в мировом сообществе. До настоящего времени все многообразие научных открытий отражается в морских технологиях и кораблестроительной практике; исследования океана, атмосферы и космоса всегда приходят на службу мореплавателям, обусловливая эффективность мореходства и безопасность человеческой жизни на море.

В истории мореплавания существует жесткий естественный отбор наилучших образцов морской техники, в проектировании и строительстве которой традиционно принимают непосредственное участие авторитетные мореплаватели, ранее это командующие успешными океанскими походами; ныне – авторитетные капитаны-наставники и морские инженеры, отвечающие за всепогодную эффективность морских работ во все сезоны года.

Современная историография не фиксирует каких-либо точных дат о строительстве первых морских судов, однако во всех письменных свидетельствах, дошедших до наших дней, упоминается о морских судах и о существовании морских торговых путей, связывавших между собой практически все человеческие цивилизации на побережье Мирового океана. Хронологически связанная история средиземноморских цивилизаций ни в коей мере не отрицает развитой восточной морской инфраструктуры, издревле существовавшей в Тихом и Индийском океанах (рис.1). В легендах и повествованиях древнегреческого философа Платона упоминается даже о еще более древней морской цивилизации – Атлантиде, владычествовавшей не только на европейском и африканском побережьях Атлантики, но также и на американском континенте, причем с хронологическими ссылками на 9000 лет до нашей эры.



***Рис. 1. Китайская джонка** – пришедшее из глубины веков совершенное парусное судно с превосходной мореходностью. Непотопляемость этих крупных судов, длиной порядка 40÷50 м, обеспечивается водонепроницаемыми поперечными переборками. При движении в узкостях или на безветрии, на Востоке издревле используются плавниковые весла, единственно не теряющие работоспособности при плавании в условиях постоянного волнения дальневосточных морей*

Подобно историческим памятникам наземного строительства и уникальным по технологической сложности шедеврам городской архитектуры древности, столь же совершенный морской флот существовал во все времена человеческой цивилизации, и всегда являлся олицетворением самой передовой инженерной мысли и производственного потенциала морских государств. Свидетельства о дальних походах древних мореплавателей не позволяют отвергать их умения опреде-

лять местоположение судна вдали от берегов в ясную или облачную погоду, днем или ночью, также как и существование достаточных познаний о морских течениях, приливах и отливах, о верности предсказаний погоды и свежих ветров. Кроме чисто теоретических навигационных и астрономических наук, географических познаний в морских лоциях и путевых манускриптах, искусство мореплавания требует сохранения и передачи из поколения в поколение неписаного практического опыта, поддержания высокого ценза моряков, способных принимать уверенные, точные и смелые решения о кораблевождении на штормовых ветрах открытого моря и опасных фарватерах прибрежных маршрутов.

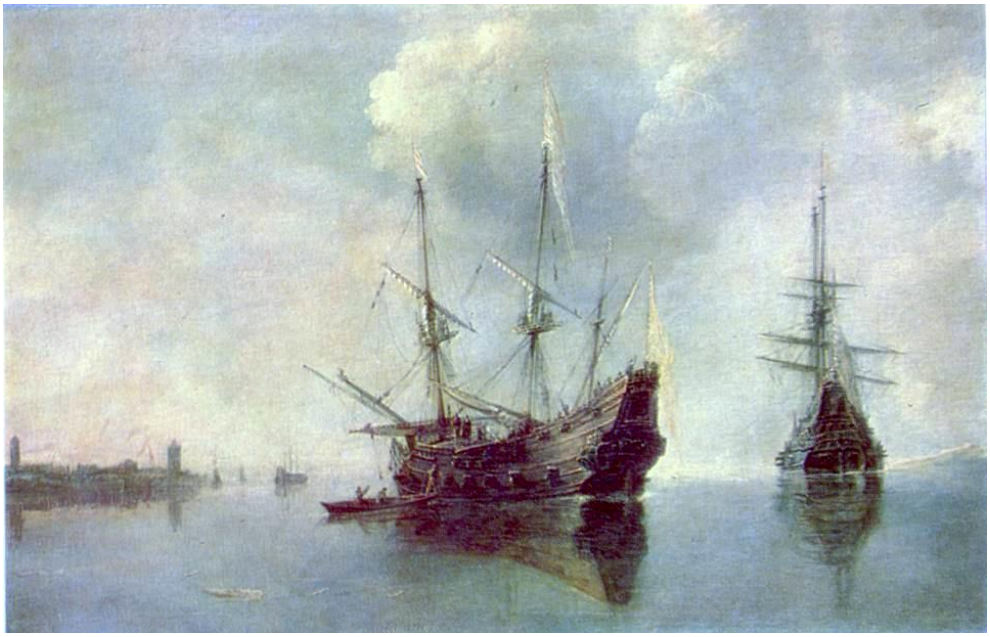


Рис. 2. «Два корабля на рейде» *(Андрис Ван Эртфельт, 1590-1652 гг., Фландрия). Живописное свидетельство о форме корпуса и архитектуре средневековых кораблей Европы. Такие корабли, с бочкообразными корпусами и взлетающими вверх кормовыми палубами, вполне уверенно осваивали новые океанские пути эпохи Великих географических открытий.*

Древние косвенные свидетельства об архитектуре кораблей и условиях мореходства нередко подтверждают высокое морское искусство восточно-азиатских стран, откуда в Средиземноморье приходили кораблестроительные технологии, новые технические средства и навигационные науки о дальнем кораблевождении.

К сожалению, общепризнанная и документально неразрывная история мореплавания берет свое начало только от средневековой Европы, от могучего и многочисленного венецианского флота. В период крестовых походов (1096-1270 гг.) Венеция была основным поставщиком крупных судов – нефов. В последующие века конструкция этих судов постоянно изменялась, и к началу XVI века венецианский четырехмачтовый неф имел вполне совершенную форму корпуса и значительные размеры. Фок- и грот-мачты несли прямые паруса, второй грот- и бизань-мачты – латинские. Такое парусное вооружение позволяло ходить довольно круто к ветру.



Рис. 3. «Бурное море», 1626 г. *(Абрахам Виллартс, 1603-1669 гг., Голландия). Условия штормового плавания требовали от капитанов парусных кораблей огромного практического опыта кораблевождения и обширных теоретических знаний о природе океана и атмосферы. Искусство проектирования и постройки новых кораблей имело в своем основании глубокое уважение к законам морской стихии - к законам сохранения жизни моряков в открытом море*

До начала XX века каждый крупный корабль считался уникальным инженерным сооружением, в проектировании и строительстве которого непосредственное участие принимали сами же мореплаватели, имевшие большой опыт морских походов и безаварийного кораблевождения в сложных и штормовых условиях плавания.



Рис. 4. «Бурное море с кораблями» *(Пьетро Темпеста (Питер Мулиер), 1637-1701 гг., Италия). Корабли не могут бесконечно долго находиться в открытом море, где их капитаны и экипажи способны достойно держать выбранный курс в любых условиях плавания. Посещение же неизведанных или необустроенных берегов может превратиться в жестокую игру за выживание корабля, что особенно опасно для парусников, гидродинамика корпуса и парусное вооружение которых оптимизированы только для уверенного плавания в открытом море*

Ответственность за мореходные качества и безопасность мореплавания новых кораблей полностью ложилась на этих же старых морских капитанов, в ожидании новых дальних походов становившихся береговыми корабелами, строившими для своих же будущих походов новые корабли с учетом как исторического опыта кораблевождения, так и собственных практических навыков и знаний особенностей эксплуатации корабля в океанском плавании. Таким образом, преемственность кораблестроительной науки жестко поверялась способностями проектировщиков – капитанов, а также подчиненных им экипажей к выполнению длительных морских экспедиций, сохранению боеспособности корабля и своих жизней в жестких условиях плавания на ими же спроектированных кораблях.

Можно принять за истину утверждение, что если определенные проектные решения по форме корпуса и корабельной архитектуре сохранялись веками и тиражировались одновременно в нескольких

странах, то соответствующие корабли можно считать вполне мореходными или оптимальными по условиям плавания в заданных районах океана или, на морском сленге, удовлетворяющими требованиям «хорошей морской практики» (*наилучшим и исторически выверенным техническим решениям, отвечающим современным условиям мореплавания*).

Очевидно, что хорош не тот корабль, который может плавать вообще, а только тот, который в состоянии ответить предъявляемым к нему требованиям по автономности, грузоподъемности, скорости хода и управляемости в простых и сложных условиях плавания. Во все времена от начала мореплавания человек пытался как можно лучше приспособить судно к взаимодействию с окружающей водной и воздушной средой. А именно в шторм эти две среды – водная и воздушная, взаимодействуя между собой, порождали наиболее опасные факторы. Это грозные волны под шквально-ураганными ветрами. Длительные время опыт строительства речных и морских судов приобретался методом проб и ошибок, что приводило к весьма продолжительным историческим срокам в эволюции судостроения. Нередко достигнутый опыт погибал вместе с его носителями – моряками. Последователи вынуждены были повторять их путь или создавать что-либо новое в области судостроения и мореплавания. Конечно, первое, к чему пришли моряки мыслящие: борьба с разбушевавшейся стихией абсолютно безнадежна. Гребцы в штормовых условиях довольно быстро выбиваются из сил, а весла, если их не убрать, ломаются и калечат гребцов. Парус обрывает, мачту ломает – в итоге на поверхности штормового моря остается неуправляемое судно с экипажем, грузом и пассажирами, молящими всех известных богов о пощаде. И вот в такие тревожные часы, кроме молитв и воззваний, истинные моряки отмечали, что широкие и округлые корпуса с высокими скулами способны удерживаться лагом на крупной волне, практически не заливаясь, а круглые, как бочонки – менее всего кренит и ломает под ударами волн, даже если на зауженных палубах нередко разгуливают грозные волновые потоки. Непротивление штормовой стихии, как главное правило непротиворечивого проектирования, ярко проявляется в фор-

ме корпуса и общекорабельной архитектуре всех наиболее известных исторических кораблей и судов океанского плавания.

Появление парусных судов неограниченного района плавания привело к эпохе Великих географических открытий, когда в течение нескольких десятилетий конца XV – начала XVI веков испанский флот посетил практически все удаленные районы Мирового океана. Но уже в середине XVI века «Непобедимая испанская армада» потерпела сокрушительное поражение от штормовой стихии в плавании вокруг островов Великобритании, когда при отсутствии минимального навигационно-гидрографического обустройства побережья, точных навигационных карт и необходимых знаний о гидрометеорологических условиях района плавания, большая часть кораблей великой эскадры оказалась на камнях и мелях вблизи побережья.

И ныне существует немало прибрежных акваторий Мирового океана, необеспеченных гаванями – убежищами от штормовых ветров. При плавании в таких открытых акваториях корабли и суда могут полагаться только на опыт капитанов и на собственные штормовые мореходные качества. В определенной степени к таким опасным районам относятся прибрежные акватории вблизи Сахалина, Камчатки и Курильских островов, где штормовая мореходность является важнейшим условием поддержания эффективности морских транспортных коммуникаций и обязательным требованием для судов и морских инженерных сооружений, занимающихся освоением морских природных ресурсов.

Древние инженерные решения по мореходности судна

Хронологически связанная история современной европейской цивилизации неотделима от многовековой истории средиземноморского мореплавания, истории взаимопроникновения народов, их культур и технологий, что наиболее концентрированно отражается в описаниях древних морских походов и в упоминаниях о кораблестроительных достижениях античных лет.

Начало хронологически связанной истории кораблестроения может быть датировано 5000-3000 годами до нашей эры и начинается с упоминаний о парусных судах Египта. В отличие от стран Востока и таинственной Атлантиды Древний Египет не славился морскими походами, его флот предназначался для плавания по Нилу. Частое изменение уровня и полноводности Нила затрудняло строительство крупных речных портов и верфей с прибрежными спусковыми стапелями, а отсутствие собственных запасов корабельного леса окончательно лишало египтян всяких претензий на роль морской державы Средиземноморья.



***Рис.5. Египетское судно**. Корпус судна приспособлен для речного плавания с частыми подходами к пологому необорудованному берегу. Плоское днище делает корпус очень поворотливым, может быть, даже излишне вёртким, что, кстати, при сильном изгибе килевой линии обеспечивает высокую рыскливость корпуса на резком речном волнении. Это уменьшает забрызгиваемость грузов внутри судна и позволяет уворачиваться от опасного заливания при жестких встречах с гребнями крупных волн*

Однако Нил, будучи крупнейшей рекой Африки, требовал от египетских корабелов соблюдения не менее строгих канонов проектирования судов речного флота, форма корпуса которых приспосабливалась для частых подходов к пологому необустроенному берегу; при

усилении ветра такое речное судно отыгрывалось на крутой и резкой волне пресноводной реки, не допуская забрызгивания грузов; а при необходимости египетские суда уверенно обеспечивали прибрежное плавание в Персидском заливе, на Красном и Средиземном морях.

Форма корпуса египетских судов характеризуется почти плоским днищем с сильным прогибом килевой линии и плавными подъемами штевней в оконечностях.

Трудно представить, как могли такие бескилевые и потому очень вёрткие суда тянуть люди или животные вверх по течению с берега реки, так как при любом креплении буксирного троса округлый корпус не будет отводиться от берега встречным потоком воды. Значит, судно способно двигаться самостоятельно с помощью кормовых весел-плавников, часто показываемых на изображениях египетских судов. Такие же кормовые весла-плавники до настоящего времени используются в других странах Африки и на Дальнем Востоке.

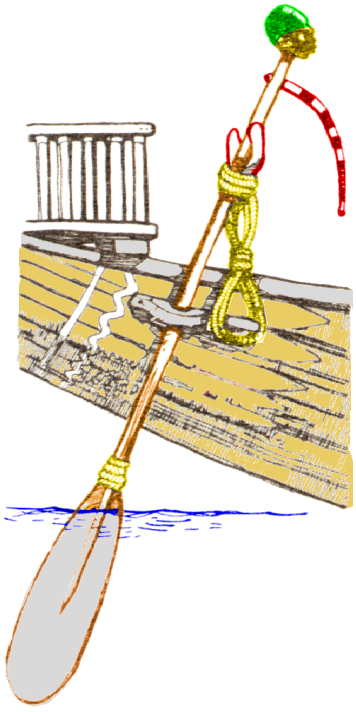


***Рис.6. Кормовое весло-плавник** является единственным движителем, которое может использоваться в штормовых условиях. Такой плавник мог раскачиваться 1÷2 гребцами, а с помощью рычага динамически регулировались угол атаки плавника и направление тяги его, как движителя*

Судя по всему, в безветренную погоду кормовые плавниковые весла использовались в качестве главных движителей (рис. 6). При движении под парусом такие весла становились обычными кормовыми рулями. Только такие кормовые плавниковые весла способны удерживать курс судна относительно крупного волнения. Видимо, их тяги вполне хватало также для поддержания управляемости, в том числе с целью отвода древнего судна от берега при его буксировке навстречу речным течениям.

Несмотря на интенсивное использование речных и морских прибрежных транспортных перевозок, несмотря на активное строитель-

ство и использование многочисленных судоходных каналов на своей территории, Древний Египет так и не стал независимой морской державой. Известно, что фараон Нэхо (612-576 гг. до н.э.), для организации внешней торговли и мореплавания, обращался к услугам финикийцев, государство которых находилось на богатой лесом территории современных Ливана и Сирии, а многочисленный флот которых служил опорой также и для египетских фараонов.

Финикия имела очень благоприятные природные условия для строительства флота: удобные бухты и устья рек на морском побережье, которые могли служить убежищем для флота в штормовую погоду; изобилие корабельной древесины – леса росли вблизи средиземноморского побережья на склонах Ливанских гор, и в них преобладали знаменитые ливанские кедр и дуб, а также другие ценные породы деревьев. Расцвет кораблестроения и морской славы Финикии отмечается в истории средиземноморья периодом 1200÷700 гг. до нашей эры. По очень многим историческим свидетельствам, финикийская морская империя опиралась на развитую прибрежную инфраструктуру своих морских портов и баз снабжения флота, а курсировавшие между ними военные и торговые корабли имели неограниченный район плавания. О финикийцах по праву можно судить как о великих мореплавателях – они имели колонии по всему побережью Средиземного моря, их знали далеко за пределами Гибралтарского пролива, в том числе на английских островах и даже за мысом Доброй Надежды. [Курти, 1977].

При ближнем плавании финикийцы использовали преимущественно легкие торговые суда, имевшие весла и прямой рейковый парус. Значительно внушительнее выглядели суда, предназначенные для дальнего плавания, и военные корабли. Крупные торговые суда имели водонепроницаемые палубы, а форма их корпуса и штормовая мореходность, к сожалению, может быть оценена только по искусству смелых и дальних походов лодий викингов, сохранивших для современных историков архитектурный тип судов с широкими открытыми палубами.

На военных кораблях финикийцев отмечалось использование носового подводного бульба, что свидетельствовало о способности этих кораблей держать ход без всхожести на волну, при повышенной заливаемости носовых палуб. Величина быстроходных кораблей – галер – иногда допускала использование двух-трех рядов весел (биремы и триремы), что делало военно-морской флот поистине всепогодным и способным к активному маневрированию на опасных прибрежных фарватерах. С тех времен во всех языках средиземноморских народов закрепилось обобщенное определение быстроходного гребного судна, как: «**Галера**».

Морская слава финикийцев говорит о хорошей мореходности их кораблей и торговых судов, вполне достаточной для дальнего плавания. Принципы проектирования формы корпуса торговых судов дольше всего сохранялись в лодьях викингов и успешно используются ныне при строительстве небольших рыболовных судов. Аналогичные по мореходным качествам современные речные деревянные лодки показывают наглядный пример уверенного хода по взволнованной поверхности волжских водохранилищ, держа курс лагом к волне.

Штормовой режим плавания лагом к волне

Форма корпуса беспалубных судов является наиболее ярким примером приспособляемости к свойствам свежего ветрового волнения, когда самые крупные девятые валы не обрушиваются внутрь корпуса, а только разворачивают корабль лагом к волне. Уменьшение забрызгивания и защита от заливаемости достигается за счет развала бортов и большой седловатости палубы, при которых в условиях предельно максимальной качки и сверхинтенсивных волновых нагрузок на остов корабля, палуба удерживается параллельно уровню поверхности каждого из волновых гребней штормового моря.



Рис.7. Финикийское морское торговое судно. *Подобно лодьям викингов. Полные суда финикийцев способны удерживаться лагом к штормовой волне в пассивном режиме плавания. В этом режиме килевая качка демпфируется развалом шпангоутов в оконечностях, а большая поперечная остойчивость корпуса позволяет отслеживать поверхность волны при очень резкой бортовой качке, что исключает заливаемость в средней части корпуса*

Плавание лагом к волне является одним из древнейших способов штормового хода на крупном волнении, изначально практиковавшимся на небольших судах озерного и речного плавания. На таком курсе наблюдается резкая бортовая качка, которая проходит в темпе ветровых волн, и, пожалуй, это единственный способ уменьшить забрызгивание открытых грузов и оттянуть опасность заливания беспалубных судов и речных лодок. Однако только такие суда могут обладать малой осадкой при большой ширине корпуса, что очень важно для прибрежного, озерного и речного судоходства, но требует особой отваги для морского штормования.

От древних египетских лодок и финикийских торговых судов класса «река-море» обводы корпуса с широким и плоским днищем унаследовали хорошо известные лодьи викингов. Аналогичными по

сути, но более высокими за счет зауженных корпусов, обладают мореходными качествами современные деревянные лодки, у которых безопасность плавания на крупной волне речных водохранилищ существенно выше, чем у модных глиссирующих катеров.

Управление речной лодкой при плавании по взволнованной поверхности пресных водоемов требует определенного опыта и немалых усилий для перекладки руля даже при ходе под мотором. Еще большая опытность и недюжинные силы необходимы для штормового маневрирования с помощью кормового весла–плавника (*обычные загребные весла при плавании на крупном волнении бесполезны, а паруса – опасны*).



Рис.8. Лодья *–парусно-гребное судно древних славян. Маневренность лодьи не хуже чем у египетских судов, что позволяло ходить по мелким российским речушкам и ходом преодолевать днепровские пороги. И все же мореходность этой речной лодьи, судя по летописям, допускала дерзкие походы на Черном море, которые не всегда заканчивались «победами» над штормовой стихией*

При усилении волнения, первым вестником о необходимости выхода на курс лагом к волне, служит сильное забрызгивание, которое происходит при ударах гребней волн по скулам движущейся лодки.

После выхода на курс лагом к волне забрызгивание и заливаемость обычно прекращаются, однако даже при очень благоприятном плавании качка в оконечностях лодки нередко превосходит ускорение свободного падения, отчего пассажирам приходится либо перемещаться в среднюю часть корпуса, либо очень крепко держаться, дабы не оказаться за бортом. Это означает, что в оконечностях подобного транспортного судна недопустимо размещать тяжелые грузы. Однако непротиворечивость проекта обводов корпуса и общего расположения такого судна подтверждается тем, что именно это же необходимо для

уменьшения массовых моментов инерции корпуса и обеспечения его беспрепятственной всхожести на встречную волну.

По гидродинамическим условиям безопасное плавание лагом к волне возможно только на свежем ветровом волнении, когда самые крупные девятые валы малоподвижны и обладают свойствами стоячих волн. При нарушении регулярности волнения, так же как и при выравнивании волновых фронтов в прибойной зоне мелководий, плавание вдоль волновых фронтов становится чрезвычайно опасным, так как на нерегулярном волнении судно невозможно удержать от сильного рыскания, а на мелководье штормовые валы теряют свойства стоячих волн, что грозит сильным боковым дрейфом, заливанием беспалубного корпуса и неминуемым опрокидыванием плоского и широкого судна.

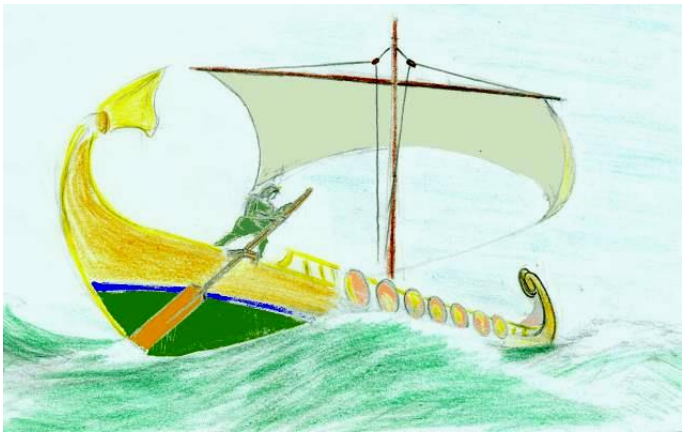


Рис.9. При усилении морского волнения *использование обычных гребных весел становится невозможным, и тогда только кормовое весло-плавник остается единственным средством для активного позиционирования корабля и предотвращения опасных контактов беспалубного корпуса со штормовыми волнами*

Главными особенностями формы корпуса, обеспечивающими штормовую незаливаемость беспалубного корабля, можно назвать следующие:

- *Низкий надводный борт, не воспринимающий кренящего давления ветра, и широкий корпус, обеспечивающий хорошую, точнее – избыточную поперечную остойчивость;*
- *Очень большое отношение ширины к высоте корпуса в районе мидель-шпангоута (B/H > 3 ÷ 4) и большая седловатость линии борта, приводящая к высоким штевням в оконечностях;*
- *Округлая форма мидель-шпангоута и развал бортов на уровне действующей ватерлинии обеспечивают крутые ветви диаграммы статической остойчивости, что в совокупности с низким*

центром тяжести корпуса позволяет судну легко удерживаться на наклонной поверхности волны. Это необходимо для обеспечения незаливаемости в средней части корпуса;

- *Зауженные и высокие V-образные шпангоуты в носу и в корме способствуют демпфированию килевой качки. Такие шпангоуты в оконечностях «расталкивают» воду при сильной килевой качке, создавая динамические условия незаливаемости в оконечностях;*
- *Волноактивная часть корпуса делается симметричной относительно мидель-шпангоута, что является главным условием выравнивания корпуса параллельно поверхности волны. Для удержания хода лагом к волне в этом случае оказываются достаточными усилия гребцов на веслах, а при усилении волнения и потере хода удержание судна на штормовом курсе возможно с помощью кормового рулевого весла-плавника.*

К сожалению, ввиду очень резкой качки, такой режим плавания нельзя использовать крупным судам, так как увеличение размеров и водоизмещения не может быть обеспечено пропорциональным ростом прочности корпуса. При плавании лагом к волне необходимы очень активные действия рулевого по удержанию курса вдоль волновых фронтов, так как при малейшей оплошности нос или корма лодки (судна) могут «взлететь» на гребне волны и в падении либо опрокинуться сразу, либо поднырнуть под следующую волну, зачерпнув губительный поток воды внутрь беспалубного корпуса.

Такая форма корпуса хорошо использует свойства ветрового волнения при малой длине разгона свободных волн (длительный шторм в океане порождает волнение в форме суперпозиции пологих волн зыби и активных «молодых» волн, что, с позиций рулевого, делает непредсказуемым подход волны к корпусу и затрудняет маневрирование с целью уклонения от ударов волны). Групповой характер ветрового волнения обусловливает появление крупных девятых валов, которые всегда имеют четко выраженную продольную вытянутость, а по динамическим свойствам эти валы подобны стоячим волнам, то есть вершина вала не несет на корпус судна высокоскоростного обрушаю-

щегося потока. Кормчему необходимо следить, чтобы корпус судна удерживался лагом к волне, тогда при подходе крутого вала судно свободно кренится, удерживая палубу параллельно волновой поверхности. Незаливаемость в таком режиме плавания обеспечивается, даже если высота девятого вала в несколько раз превышает высоту надводного борта судна (или речной лодки).

При взгляде со стороны получается захватывающе красивое плавание между гребнями волн, которое, конечно же, носит экстремальный характер. Кажется, что судно полностью погружается в пучину между белыми гребнями девятых валов, но затем оно лишь на мгновение появляется над вершинами кипящих волн в полной сохранности и продолжает движение с сильнейшими пируэтами на продольной качке! Мореходность такого судна не безгранична, и в случае нарушения характера качки от неуправляемого рыскания судна или при усилении шторма первая губительная волна все же попадет в корпус в районе скулы или кормовой раковины.

Активное штормование с ходом по волне

Другой дерзкий метод штормового плавания пришел на флот с введением парусного вооружения. Это штормовой ход по волне, который может использоваться современными спортивными яхтами. Древними аналогами таких парусников можно назвать арабские парусники, китайские джонки и рыболовные суда русских поморов. Причем для русских поморов поддержание активных режимов штормового плавания являлось условием спасения от усиливающихся штормов в Баренцевом море. Держа ход по волне, судно или пыталось укрыться в прибрежных шхерах при северных ветрах, или войти в битый лед на границе арктических ледовых полей при ветрах южных.

Штормовой ход к берегу необходим еще и потому [Бадигин К. С., 1956], что суда поморов, приспособленные к лову рыбы и плаванию во льдах, не обеспечивались достаточной автономностью по запасам топлива и продовольствия, чтобы длительное время отстаиваться в дрейфующих льдах.

При штормовом плавании в открытом море поморы также не могли выдержать затяжных циклонов северных широт, длящихся обычно не менее недели. Непрерывный аврал на штормовой парусной вахте, холод и резкая изнуряющая качка внутри корабля в течение первых суток способны вымотать экипаж, лишить его сил для активного сражения за жизнь корабля.



Рис.10. Активное удержание корпуса на гребне волны *возможно только для небольших судов или шлюпок. Такое плавание всегда является экстремальным и потому не может быть рекомендовано для крупных судов открытого моря*

Форма корпуса и парусное вооружение корабля обладали следующими проектными и эксплуатационными особенностями:

- *Корпус судна должен иметь полные кормовые обводы с глубоко посаженным пером руля. При этом надводная часть кормы не должна нависать над водой, чтобы не допускался захват корпуса быстро движущимся гребнем попутной волны. Кормовой руль заглубляется настолько, чтобы его рабочая площадь всегда находилась ниже уровня подошвы волны, так как поток воды в гребне движется в попутном направлении и быстрее самого судна.*
- *Штормовой парус должен обеспечивать перемещение центра парусности в нос, что в совокупности с полной кормой и обтекаемыми носовыми обводами делает возможным удержание курса с ходом по волне и по ветру. Носовая оконечность не должна иметь заостренного и килеватого форштевня, так как последний будет перемещать центр динамического бокового сопротивления в нос и тем самым нарушать устойчивость на штормовом курсе.*

- *В отличие от судна, штормующего лагом к волне и практически без хода, штормовое плавание поморов скорее напоминает скоростную гонку с испытанием прочности парусного вооружения и предельным напряжением сил экипажа. В случае, если корпус все же захватывается волной и ставится лагом, то происходит либо быстрое опрокидывание, либо срыв паруса. Выход на исходный курс будет возможен только после повторной установки штормовых парусов на фок-мачте.*



Рис.11. Рыболовное судно русских поморов. *Образец корпуса, допускающего активное маневрирование в штормовом море, что необходимо для ухода в укрытие от реальной штормовой опасности. При этом обводы корпуса учитывают особенности штормового плавания по волне под управлением штормовых парусов и навесного руля*

Заливаемость верхних палуб при таком режиме плавания не исключена, но разрушительная сила попутной волны ослаблена ходом судна вперед, и поэтому вода на палубе не представляет непреодолимых трудностей по управлению рулем и парусом. При плавании в открытом океане, когда ветровые волны складываются с не менее ин-

тенсивной зыбью, в условиях интенсивной качки активное управление штормовым ходом может стать невозможным.

Рассмотренные выше два типа корпуса представляют собой два проекта, в которых первое судно является наилучшим для плавания на веслах, второе – для плавания под парусами. Оба режима плавания сохранились до наших дней: первый используется при изготовлении спасательных шлюпок и небольших рыболовных судов, второй – на спортивных яхтах и буксирах спасателях. Если не учитывать влияния палубных надстроек, то это превосходные малые суда, способные сохранять ход и управляемость при движении в условиях усиливающегося шторма.

Но это режимы плавания, в которых корпус судна подвергается огромным силовым перегрузкам при взаимодействии со штормовой волной, особенно при изгибах на килевой качке и резких бортовых раскачиваниях, что недопустимо для крупных судов по двум причинам:

- *Ограниченная безопасность штормового плавания, так как при усилении волнения непредсказуемость появления ветровых волн и зыби вблизи корпуса превзойдут опыт и искусство рулевого или же энергия волн и ветра превзойдет возможности экипажа по управлению парусным вооружением;*
- *Естественно, что такое судно, при необходимости поддержания хода и управляемости, будет предполагать интенсивный обмен энергией между корпусом и волнением. Это недопустимо для крупного судна, потому что пропорциональное увеличение прочности корпуса нереализуемо также и по техническим причинам.*

Оба проекта древних судов, как для плавания лагом к волне, так и для активного штормования по волне, требуют повышенной начальной статической остойчивости, достигаемой за счет существенного увеличения ширины корпуса на уровне действующей ватерлинии, а также за счет развала бортов, приводящих к увеличению площади верхних палуб, и, как следствие, при усилении шторма – к опасной

заливаемости беспалубных лодей викингов или разрушительному разгулу штормовых волн по широкой палубе парусников.

И снова, обращаясь к Финикии, мы находим третье решение как прообраз будущего всепогодного корабля. Это древний военный корабль - галера.

Режим пассивного штормования носом на волну

Военные корабли финикийцев, в отличие от их торговых судов, не были симметричными относительно мидель-шпангоута. Корабли имели приподнятую над водой корму и низкий бак, с заглубленным под воду носовым бульбом.

Существует однобокое мнение, что бульб галеры выполняет роль только боевого тарана. Бульбовый нос заметно затрудняет маневрирование при таранных или абордажных атаках, а, учитывая относительно малые скорости парусно-весельных кораблей, увеличенная за счет бульба смоченная поверхность корпуса может заметно снизить скорость хода таких боевых кораблей. В качестве боевого тарана такой бульб может оказаться не очень надежным и небезопасным устройством, так как, являясь продолжением прочного корпусообразующего киля, он, использованный как таран, может деформировать или разрушить всю систему поперечного набора на днище корпуса, что приведет к обширной разгерметизации и быстрому затоплению корабля.

В то же время, атакуемое судно, кроме преимущества в маневренности и ходкости, сможет встретить таранящий корабль фронтальным огнем со всего борта, а если и не сможет увернуться от перпендикулярного таранного удара, то при сохранении общей прочности корпуса у экипажа будет время и возможность для заделки не очень крупной подводной пробоины и поддержания аварийной плавучести.

Установка тарана не может быть обоснована необходимостью улучшения ходовых качеств ни при движении на веслах, ни под парусами. Бульб лишает корабль устойчивости на курсе относительно ветра, так как вызванное им смещение вперед центра бокового сопротивления не может быть скомпенсировано аналогичным смещением в нос общего центра парусности.

И все же применение бульба можно считать революционной технической находкой древнего кораблестроения. *Бульб – снимает ограничение на дальность и длительность плавания*, обеспечивая возможность безопасного пассивного штормования корабля курсом носом на волну, при котором корабль самостоятельно выходит на требуемый курс даже при срыве штормовых парусов и при невозможности активного использования кормовых рулевых весел.

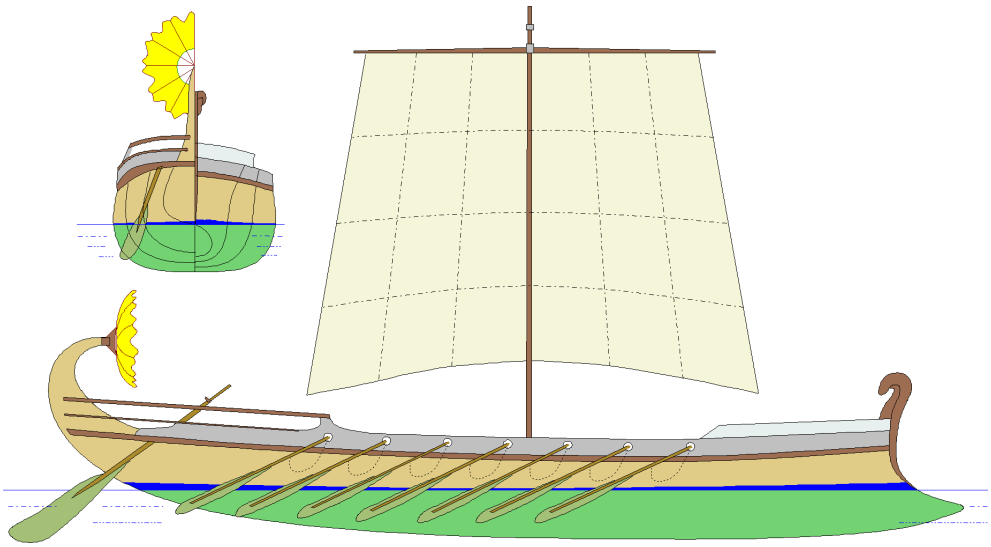


Рис.12. Древний военный корабль. *Изображен "Корабль Аргонавтов", унаследовавший мореходные качества финикийских военных кораблей. Асимметричный относительно мидель-шпангоута корпус парусно-гребного судна позволяет удерживать курс штормового плавания носом на волну. Для корабля относительно малого водоизмещения активное удержание на этом штормовом курсе возможно с помощью кормовых рулевых весел-плавников, которые в режиме «юления» могут придавать кораблю небольшой ход вперед - навстречу штормовым волнам*

На взволнованном море невозможно управиться даже с легкими веслами на маленькой шлюпке. Порывистый штормовой ветер способен превратить любые паруса в источник дополнительной опасности не только для парусной команды, но и для всего корабля в целом. Только кормовые весла-плавники при умеренном волнении могли служить активными движителями для приведения корабля на штормовой курс, а отсутствие плавникового ахтерштевня и бульбовый нос создавали условия для пассивного штормования на курсе носом на

волну без хода, что и спасало финикийский галерный флот от неминуемой гибели в открытом штормовом море.

Платой же за конструктивное обеспечение безопасного штормового плавания стал отказ от возможности подхода к пологому необорудованному берегу, а также заметная потеря всех боевых качеств корабля, обусловленных ухудшением маневренности и ходкости на тихой воде.

Итак, финикийский военный флот строился для длинных морских походов в открытом море, простиравшихся вплоть до берегов Англии и Норвегии на севере, Мадагаскара, Персидского залива и Индии – на юге, что как раз и соответствовало колониальной политике этой морской империи, имевшей порты и крепости практически на всем средиземноморском побережье и во многих пунктах Атлантики, которые в будущем стали новыми центрами европейской цивилизации.

Особенностями формы корпуса, обеспечивающими безопасное штормование подобно флюгеру на курсе навстречу ветру и волнению, являются:

- *Нарушение симметрии корпуса относительно мидель-шпангоута со значительным смещением центра величины и центра бокового гидродинамического сопротивления в нос. Установленный с этой целью носовой бульб благоприятно сказывается на устойчивости корпуса в положении навстречу волнению, при этом динамический центр качки и рыскания оказывается вблизи форштевня, что способствует стабилизации продольной качки;*
- *Смещение центра парусности надводной части корпуса за счет кормовой надстройки и объемных кормовых фигур служит хорошим средством для использования силы ветра при приведении корабля носом на волну. Можно обратить внимание на низкий бак древних гребных и парусных судов, а это означает, что мореплаватели не боялись попадания воды на палубу через форштевень. Любопытной деталью корпуса является также наличие гальюна и князвдигеда, которые способны разрушить моно-*

литность фронта, падающего на носовую палубу гребня штормовой волны;

- *Плавный подъем днища в корме и нависание кормовой оконечности высоко над водой раскрепощают рыскание. Можно объяснить необходимость использования именно кормового рулевого весла, которое при маневрировании способно исполнять роль очень эффективного плавникового движителя, обеспечивающего произвольное направление силы тяги, и, пожалуй, единственно эффективного средства для маневрирования в свежую погоду, когда бортовые весла становятся неуправляемыми, а парус используется только для придания корпусу свойств «штормового флюгера».*

Такие галеры существовали вплоть до нового летоисчисления, их строили греческие, затем римские кораблестроители. Техническое обеспечение этих мореходных кораблей требовало строительства причалов, углубления подходных фарватеров, а также установки маяков и множества навигационных знаков для проводки кораблей вблизи прибрежных скал и отмелей.

На примере трех вышеприведенных проектов древних кораблей и судов были показаны почти все известные в кораблестроении инженерные решения для обеспечения искомой мореходности корпуса.

Документально отмечен не менее чем полуторатысячелетний период истории кораблестроения и парусного мореплавания, в течение которого корабелы в основном придерживались вышеописанных проектных решений в отношении обводов корпуса и принципов обеспечения безопасного плавания в штормовых условиях. Фактически за это время существенные изменения можно отметить только в технологиях строительства большого количества крупных кораблей, на которых постоянно совершенствовалось парусное вооружение. Во многих случаях различия в форме корпуса и общей архитектуре корабля обосновывались их своеобразной специализацией, применяемой для кораблей и судов прибрежного плавания с ограниченной мореходностью.

Новое становление средиземноморского флота

По преданиям, римское кораблестроение достигло расцвета во времена правления Гая Юлия Цезаря (100-44 гг. до н.э.). История мореходства молодой Римской империи в большей степени определялась неутихающей борьбой со старыми морскими странами – Финикией, Карфагеном, а затем и с Византийской империей. В 30-е годы до н.э. и ко времени мессианских путешествий христианских апостолов Средиземное море было открыто для свободного торгового мореплавания. Но в годы ослабления римского контроля над этим районом в Средиземноморье снова стали наведываться норманны и арабские искатели легкой морской добычи, постоянное крейсерство вели взбунтовавшиеся римские колонии, да и собственные «адмиралы», неполадившие с имперскими амбициями центральных властей, тоже становились на морскую дорогу вне «римского закона». В таком неопределенном и опасном для мирного плавания состоянии средиземноморское мореходство оставалось практически все первое тысячелетие новой эры.

В столь сложной обстановке приморские государства нуждались в надежной охране своих портов от непоседливых «жителей моря», обладавших очень мореходными, но тяжелыми и тихоходными кораблями. Для защиты торговых судов от пиратов, саксонских на севере и иллирийских на юге, римлянами были созданы легкие и быстроходные парусно-весельные корабли – либурны. Считается, что либурн является прототипом средиземноморской галеры, просуществовавшей вплоть до XVIII века. Целью этого проекта ставилось достижение максимальной скорости хода, и, как следствие, новые эксплуатационные требования заставили серьезно пересмотреть концепцию мореходности и безопасности штормового плавания корабля в целом.

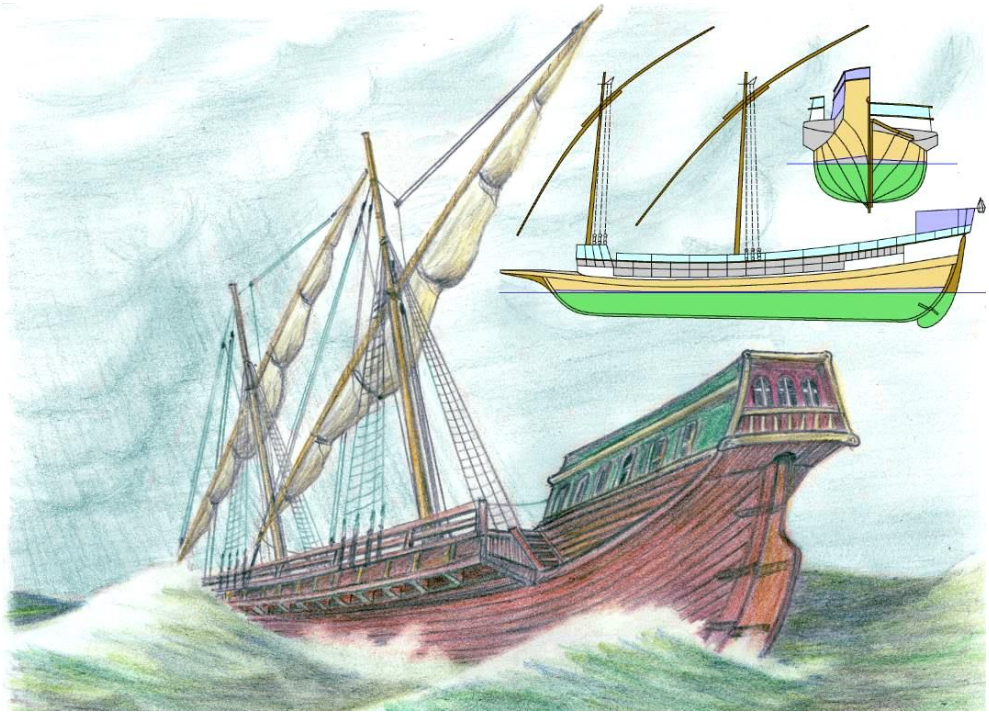


Рис. 13. Средиземноморская галера. *В архитектуре парусно-гребного корабля прибрежного плавания основное внимание уделяется максимальной скорости хода и повышенной маневренности. Удовлетворение этих требований возможно за счет штормовой мореходности. При крепком ветре море не допускает вооруженных инцидентов между кораблями, а прибойные волны исключают возможность десантов на открытом побережье. То есть, галерам важнее быстрый выход на защиту побережья, а при усилении ветров просто прятаться в гаванях, где экипажи могут противостоять непрошенным с моря гостям в составе пограничных отрядов*

В первую очередь быстроходные парусно-весельные корабли могли быть эффективно использованы для охраны водного района вблизи крупных морских портов и прибрежных городов. Такие корабли были необходимы также для конвоирования коммерческих судов или для быстрой доставки особо важных пассажиров и небольших грузов. Удлиненный, хорошо обтекаемый и очень устойчивый на курсе корпус галеры позволял ей ходить под очень крутыми курсами на почти встречных ветрах, что существенно расширяло возможности боевого использования этих кораблей при малых ветрах и в отсутствии океанского волнения или зыби. Однако при усилении ветра и волнения высокая ходкость уже требовалась только для быстрого укрытия от встречи со штормами, и галеры прятались в многочислен-

ных прибрежных гаванях и портах-убежищах, находившихся в средиземноморских владениях Римской империи.

Только специализированные быстроходные и маневренные корабли, корпуса которых были оптимизированы для хода на тихой воде, были в состоянии эффективно защищать побережье и реально противостоять тихоходным и зависящим от воли ветра океанским парусникам, основным районом плавания которых было открытое штормовое море. Именно повышенная ходкость и маневренность на тихой воде позволяла кораблям охраны водного района преследовать и атаковать с наиболее выгодного курса одинокие пиратские корабли и их береговые пристанища, и в том числе с применением таранно-абордажных атак или быстрых десантных операций в портах и у необорудованного побережья, где длинный штормовой князвдигед мог служить своеобразным мостиком для высадки воинских отрядов.

Высокая скорость хода средиземноморских галер, в том числе на встречных ветрах и в безветрии, их отличная управляемость и высокая маневренность при одновременном или попеременном использовании гребных весел и латинских парусов реально позволяла им участвовать в абордажных боях, применяя безбульбовые таранно-абордажные атаки. Кстати, именно наклонным вперед форштевнем у неприятельского корабля мог быть разрушен прочный палубный ширстрек – один из главных элементов общей прочности корпуса, а если при этом образовывалась пробоина, то она постоянно расширялась при килевой качке даже на умеренном волнении. Атакующая же галера могла воспользоваться штормовым князвдигедом в качестве мостика для абордажной команды, но от таранного удара она не менее сильно повреждала надводную часть своего форштевня и лишалась носовых парусов. Безусловно, что при безбульбовой таранной атаке общая прочность корпуса атакующего корабля не нарушалась, а сам корабль сохранял способности для безопасного перехода в близлежащий порт для ремонта.

Но все же всевозможные боевые аспекты использования кораблей океанского плавания никогда не будут совместимыми с реальной мореходностью и уж тем более - штормовой. Любое мореходное суд-

но, приспособленное к длительному плаванию в открытом море и находящееся вдали от ремонтных баз или безопасных гаваней, даже после небольших военных столкновений на море очень сильно рискует не вернуться в свой родной порт.

К особенностям быстроходного парусно-весельного корабля, обеспечивающим высокую ходкость и маневренность на спокойном море, можно отнести следующие конструктивные элементы формы корпуса и парусного вооружения:

- *На средиземноморской галере уже нет бульба, так как он, очевидно, не выдерживал испытаний на ходкость и маневренность. Обводы корпуса очень плавные с заостренными ватерлиниями и сильным развалом бортов в оконечностях;*
- *Форма корпуса в целом отвечает требованиям хода лагом к штормовой волне, при котором управляемость обеспечивается кормовым навесным рулем, а требуемая скорость хода поддерживается косыми латинскими парусами;*
- *В носовой части корпуса сохраняется большая полнота обводов и делается более крупный гальюн, так как отсутствие бульба существенно снижает стабилизацию носовой оконечности на встречном волнении и приводит к усиленной заливаемости на встречном волнении;*
- *Тем не менее, кораблестроители уменьшают высоту бака и существенно увеличивают парусность юта и кормовой надстройки. Таким образом обеспечивается возможность пассивного штормования носом на волну без хода или под штормовым парусом на кормовой бизани;*
- *Удифферентовка корпуса на корму, установка ахтерштевня и малая полнота вогнутых ветвей кормовых шпангоутов позволяют привести центр бокового сопротивления корпуса на одну вертикаль с центром парусности латинских парусов. Это необходимо для достижения устойчивости в движении под парусами, а также делает эффективной работу кормового навесного руля.*

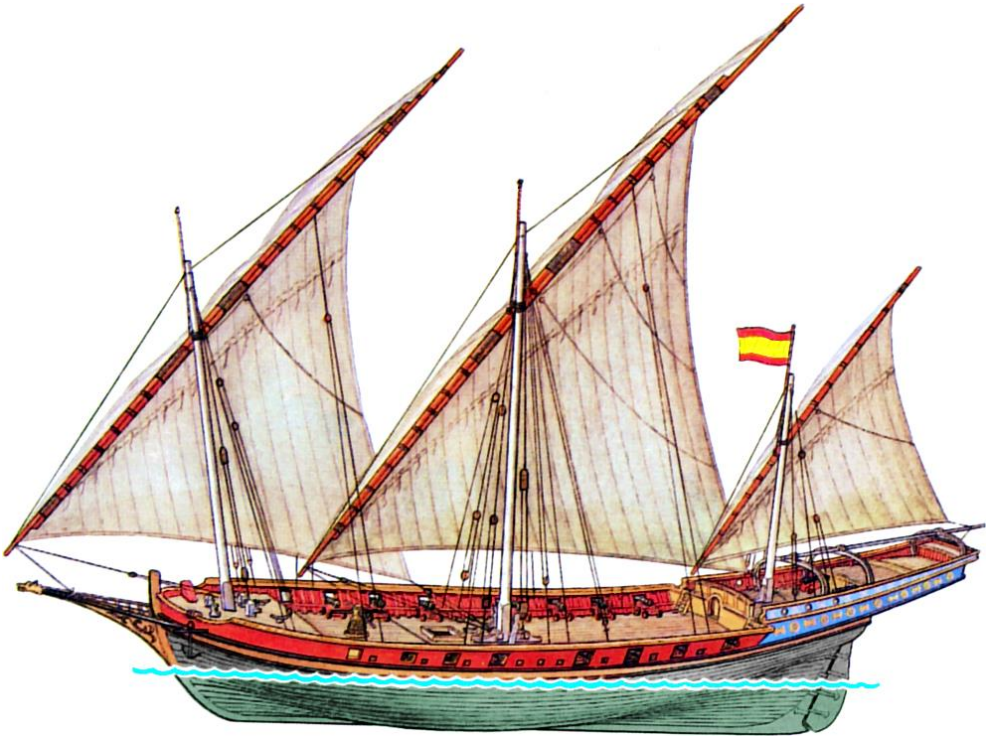


Рис.14. Испанская шебека *– быстроходное и маневренное парусно-гребное судно. Архитектура этого корабля является традиционной для арабских мореплавателей, безраздельно господствовавших в Индийском океане и принесших свое кораблестроительное искусство в Средиземноморье. Широкая палуба шебеки позволяет размещать пушки, использовать гребные весла и вольготно управляться с латинскими парусами. Корпус судна хорошо демпфирует качку при ходе лагом к волне, но также позволят активно двигаться по волне под управлением глубоко посаженного подвесного руля, а при усилении шторма может встать на курс носом на волну, удерживая бизань в качестве штормового паруса. В будущем шебека послужила прототипом для еще более быстроходных галер, а также для всепогодных испанских судов эпохи Великих географических открытий – каравелл*

По мере совершенствования и распространения кораблестроительных технологий по европейским странам разнообразие в форме корпуса и общей архитектуре сохранялось только в кораблях прибрежного или озерно-речного плавания, для которых штормовые мореходные качества могли быть пожертвованы ради малой осадки, высокой скорости хода и маневренности, а в некоторых случаях – ради эстетического оформления внешнего вида прогулочных судов. К примеру, для Римской империи такого флота тихой погоды было вполне достаточно, так как все ее морские коммуникации не простирались

далее восточной части Средиземного моря – побережья Малой Азии и устья Нила в Египте.

В Римском флоте для дальних походов, в том числе и по средиземноморью, в целом сохранялись кораблестроительные традиции древних финикийцев. Но римляне уже не отваживались на дальние океанские походы, так как еще длительное время реальное господство на море оставалось за остатками бывшего могущественного Финикийского флота. После потери независимости и истощения экономической мощи малоазиатских провинций, выходы в Атлантический океан закрывались Карфагеном, а затем ограничивались арабской торговой экспансией и активным военным присутствием на средиземноморье как арабского, так и норманнского флотов. По этой причине центры средневекового кораблестроения перемещаются в Северную Европу, а после установления единого правления Османской империи – только на северном побережье Африки, центрами европейского мореходства становятся также и обретшие независимость Португалия и Испания.

Флот Великих географических открытий

В начале первого тысячелетия упоминается о существовании великого флота Восточной Азии и об активном мореходстве в Тихом и Индийском океанах.

Чжоу Чун описывал морские суда того времени следующими пышными фразами: «Корабли, что плавают по Южному морю в его южной части, подобны домам. Когда их паруса поставлены, они словно огромные облака в небе. Их рули имеют несколько десятков футов в длину. На каждом корабле по несколько сот человек, в его трюмах – запас зерна на год». Восхищение Марко Поло китайским военным флотом также не знало границ. Покинув в 1292 году Китай, он писал: «Великий Хан, вооружаясь, построил 14 больших кораблей, и каждый из них имел по четыре мачты… В каждый корабль он посадил по 600 человек и погрузил провизии на два года… То был флот, почти наверняка превосходящий любой европейский, не исключая английский флот Эдуарда I и французский флот Людовика IX Благочестивого».

В Европу восточное морское искусство приносили арабские мореплаватели, господствовавшие как в Индийском океане, так и на Средиземном море.

Генрих Мореплаватель, третий сын португальского короля Жуана I и его жены, англичанки Филиппы Ланкастерской, основал в Сагрише учебное заведение для будущих великих кораблестроителей и мореплавателей Европы. В первой португальской школе собрались математики, астрономы, картографы, капитаны и летописцы всех национальностей – португальцы и испанцы, венецианцы и генуэзцы, арабы и евреи. Они составляли карты и астрономические таблицы, усовершенствовали компáсы, астролябии и градштоки (*древние прообразы квадранта и секстана*). После ряда опытов в этой мореходной школе объединили старинные прямые паруса с косыми арабскими на корпусе типично арабского судна – испанской шебеки, что стало первым океанским кораблем Европы с романтичным названием – **каравелла.** Генрих Мореплаватель видел свою миссию в поиске южного пути в Индию, оживлении морской торговли и, что не менее важно – в распространении христианской веры по всему миру.

Наступление эпохи Великих географических открытий (XV÷XVI вв.) снова может быть охарактеризовано строительством кораблей, наилучшим образом приспособленных к длительному океанскому плаванию под парусами. Учитывая небольшой тоннаж кораблей Колумба и Магеллана, нужно признать истинное совершенство корабельной науки того времени, отметить гармоничность в сочетании архитектурных и гидромеханических решений, а также точность в раскрое парусного вооружения и его полное соответствие особенностям гидродинамики корпуса в условиях штормового плавания на волнении.

Первые дальние океанские плавания европейцев совершались на крупных высокобортных парусниках — каракках и каравеллах.

В 1487-1488 годах португальский навигатор ***Бартоломео Диас*** сумел дважды обойти мыс Доброй Надежды и затем прибыл в Лондонский порт.

В 1497-1499 годах португальский мореплаватель ***Васко де Гама*** на каравеллах «Сан-Габриэль», «Сан-Рафаэль» и «Беррио» совершил плавание из Лиссабона в Индию. Обогнув Африку, он при содействии арабского лоцмана впервые проник в малабарскую гавань Каликут (ныне – Кожикодэ), осуществив старую мечту европейцев о морском пути в Индию. В 1502-1503 и 1524 годах он совершил еще две успешных экспедиции в Индию, установив таким образом постоянный морской путь в Юго-Восточную Азию.

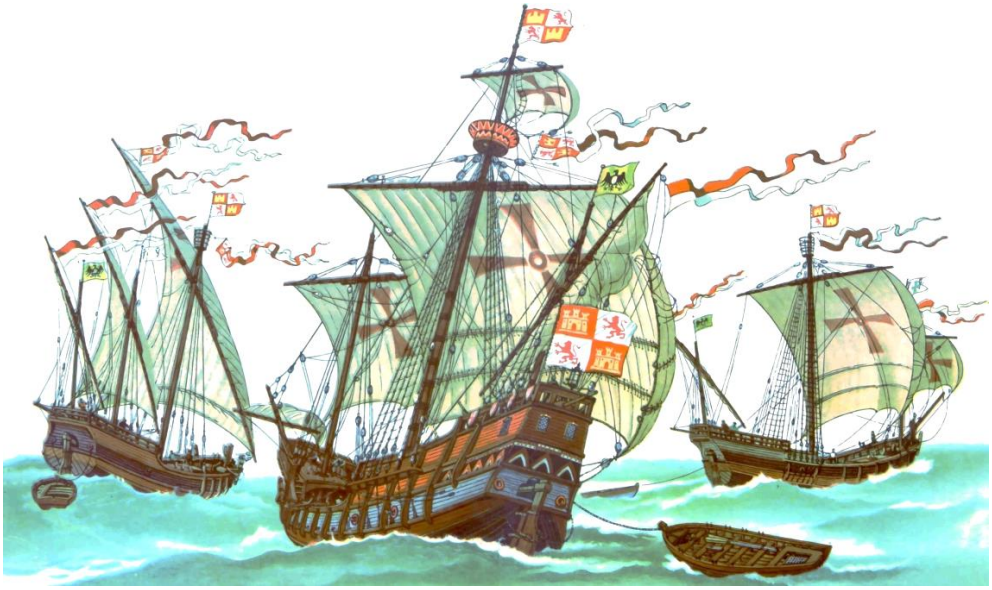


Рис.15. Корабли первой трансатлантической экспедиции Христофора Колумба *в 1492 году. Слева направо: каравелла «Нинья», каракка «Санта-Мария» и каравелла «Пинта». Идеальная штормовая мореходность всех кораблей Колумба позволила ему совершить столь дерзкие и длительные океанские походы.*

В 1492 году генуэзец ***Христофор Колумб***, находясь на службе у короля Испании Фердинанда, добился контракта на поиски западного пути в Индию, и 2 августа каракка «Санта Мария» и две каравеллы – «Пинта» и «Нинья» – вышли из испанского порта Палос, чтобы в ночь с 11 на 12 октября с «Пинты» впервые увидели Багамские острова вблизи Америки. Таким образом, была открыта дорога к Новому Свету. До 1504 года Христофор Колумб под испанским и флорентинец ***Америго Веспуччи*** под португальским флагами совершили ряд плаваний через Атлантику, в том числе к берегам Южной Америки.

В 1497 году на северо-запад, на поиск северного маршрута в Китай, отправилась английская экспедиция под командованием Джона Кэбота (венецианца ***Джованни Каботто***), который на каракке «Мэтью» дошел до Лабрадора и Терра Нуова, посетив Америку, ранее доступную только викингам. Позже, в 1594÷1597 годах, нидерландский мореплаватель ***Вильям Баренц*** также совершает три безуспешные экспедиции в Северный Ледовитый океан в поисках северо-восточного пути в Китай и окончательно закрывает для парусных кораблей северные маршруты вокруг Евразии.

Возможность достичь Индию западным путем могла быть доказана лишь кругосветным плаванием через Магелланов пролив или вокруг мыса Горн у Южной Америки, с возвращением вокруг мыса Доброй Надежды у южной оконечности Африки. Испанскую западную экспедицию на Восток в 1519-1522 годах возглавил португалец ***Фернандо Магеллан***. Из пяти каракк экспедиции Магеллана («Тринидад», «Консепсьон», «Сантьяго», «Сан-Антонио» и «Виктория») в порт приписки через три года вернулась одна лишь «Виктория» – первое европейское судно, обошедшее вокруг света.

В штормовых условиях у Магеллана погибла самая маленькая каравелла «Сантьяго», которая вышла на разведку в поисках прохода в Тихий океан. После нескольких дней плавания вдоль побережья неизведанной Южной Америки, каравелла была разбита бурей о прибрежные скалы. Другие четыре корабля с честью выдержали все невзгоды длительной экспедиции:

- после двадцатидневного плавания по проливу, впоследствии названному именем первооткрывателя, корабли Магеллана увидели перед собой другое море — Южное, в будущем – Тихий океан. Кормчий Иштебан Гомиш захватывает корабль «**Сан-Антонио**» и возвращается в Испанию;

- самый ветхий корабль «**Консепсьон**» экипаж покидает на острове Сёбу Марианского архипелага. Это произошло после гибели Фернандо Магеллана и его войска 27 апреля 1521 года;

- капитаном «**Тринидада**» становится друг Магеллана Гонсалос де Эспиноса. «Тринидад», словно корабль-призрак, долго ищет про-

ход из Тихого океана в Атлантический у побережья Панамы, затем возвращается к Молуккскому архипелагу и оказывается в плену у португальских властей. Эспиноса с двумя моряками и священником чудом уцелели и добрались до Испании;

- баск Себастьян эль Кано, бывший участник мятежа в бухте Сан-Хулиан, ведет «**Викторию**» через Индийский и Атлантический океаны. Выдержав жестокую бурю у мыса Доброй Надежды, 6 сентября 1522 года «Виктория» с 18 членами экипажа скромно встала у причала Севильи. Карл V справедливо пожаловал к гербу Себастьяна де эль Кано земной шар с надписью «Primus circumdedesti me» — «Ты первый обошел вокруг меня».

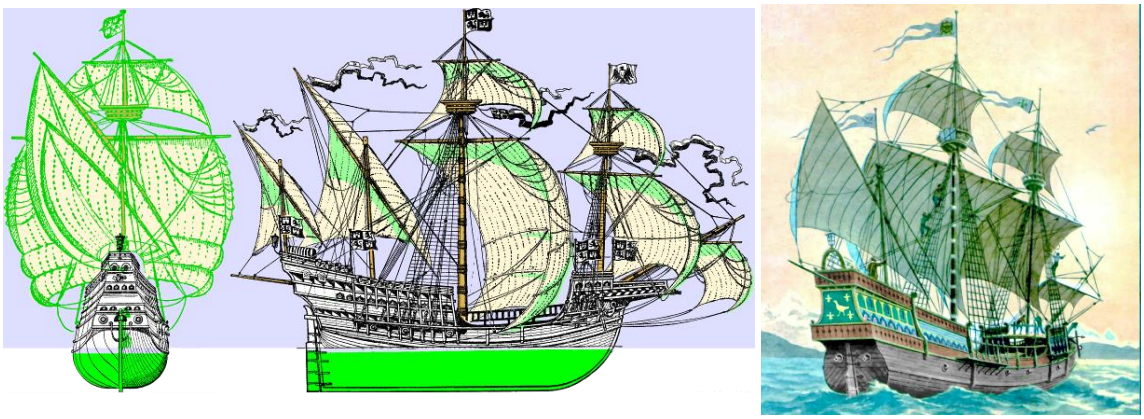


***Рис.16. Реконструированное изображение корабля времен Фернандо Магеллана**, преодолевающего встречные ветра на выходе в Южное море – Тихий океан. Мореходные качества новых кораблей вполне достаточны, чтобы в исторических описаниях великих экспедиций практически не упоминалось об опасностях штормового плавания.*

Все это свидетельствует о высочайшем уровне кораблестроительных технологий и «навигацких» наук, которыми обладали Испания и Португалия – первые мировые державы, распространившие свет своих цивилизаций по всему земному шару. Это свидетельствует о реально неограниченной мореходности средневековых кораблей, а также о том, что главной опасностью на море становилось отсутствие навигационного, гидрографического и гидрометеорологического обеспечения мореходства. Наступала эпоха глобального навигационного обустройства опасного для плавания побережья, морских бухт и проливов. Устанавливались маяки и туманные гонги, заполнялись бе-

лые пятна на морских навигационных картах, издавались многочисленные лоции. Но это уже особая история, и не столько о штормовых условиях плавания, а больше о защите кораблей от неожиданной встречи с мелями и прибрежными скалами.

Многочисленные испанские тихоокеанские экспедиции 1525÷1565 гг. позволили установить надежные торговые пути в Восточную Азию и Южную Америку. Богатый опыт дальних плаваний подтвердил высокие мореходные качества парусных кораблей тех лет, совершенствование которых в будущем касалось лишь парусного вооружения, которое становилось более удобным в управлении. Повышалась скорость хода парусных кораблей при различных курсах относительно ветра, а специальными штормовыми парусами обеспечивалась безопасность плавания в любых погодных условиях.

Вершиной средневекового кораблестроительного искусства можно назвать парусные галионы, пришедшие из Испании XVI века на смену южноевропейским караккам. В 1577—1580 годы состоялось второе кругосветное плавание англичанина Френсиса Дрейка. Его корабль «Пеликан», в походе переименованный в «Золотую лань», не отличался большими размерами, водоизмещение составляло порядка 100 тонн. По заданию королевы Англии Елизаветы II из порта Плимут в южные моря вышла эскадра из пяти кораблей. Пройдя Магелланов пролив и будучи отброшенным сильнейшим штормом к оконечности Южной Америки, к мысу Горн, Френсис Дрейк остался в Тихом океане с одной своей «Золотой Ланью». Дерзкое плавание в ревущем штормовом Тихом океане начиналось с открытия широкого пролива между Южной Америкой и Антарктидой, позднее названного именем Дрейка.

Это был первый в мире крейсерский рейд одиночного корабля, в котором испанским морским коммуникациям был нанесен ощутимый урон, а военный приз, доставленный Дрейком в Англию, в полтора раза превысил годовой бюджет этой новой морской державы. С этого момента в историю мореходства жестко вплетаются пушки и политика и, по-видимому, слегка покрывается тайной сама история инженерной эволюции штормовой мореходности флота, несмотря на без-

условную реакцию в виде многочисленных морских катастроф, формально замалчиваются достижения испанских и португальских корабелов и навигаторов, в полной мере унаследовавших лучшие традиции арабских мореплавателей.

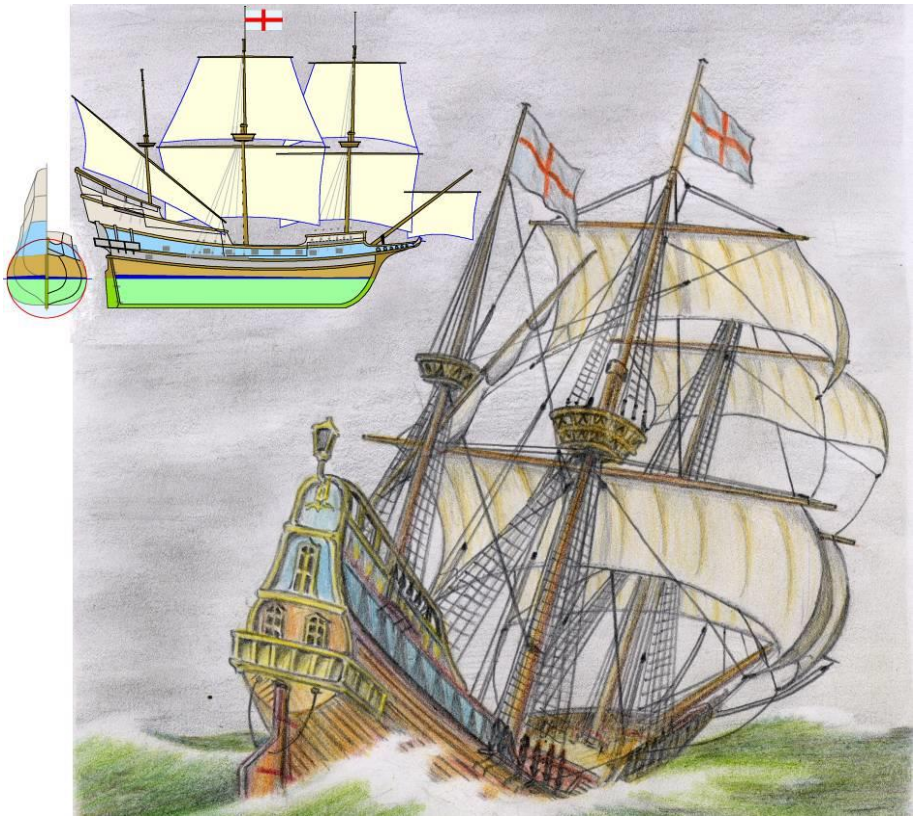


Рис.17. Галион «Голден Хинт» *(«Золотая лань»). Идеальный корабль для дальних океанских экспедиций. Штормовые режимы плавания обеспечиваются исключительно специальной формой корпуса. При усилении штормового ветра экипаж убирает все паруса, и судно подобно флюгеру выходит на курс носом на волну.*

Возвращаясь к проектно-техническим решениям по обеспечению штормовой мореходности, важно обратить внимание на строгое следование принципам целевого непротиворечивого проектирования корабля, и отметить общую гармонию в архитектуре замечательных или наиболее известных кораблей средневековья. Так, на примере галиона прекрасно иллюстрируется оптимальность гидродинамической формы корпуса и эффективность парусного вооружения в условиях дальнего океанского плавания, при общеархитектурных решениях в конструкции корабля без каких-либо бесполезных вещей и избыточных надстроек или украшений на борту корабля.

Экипаж среднетоннажных средневековых кораблей в штормовую погоду уже не мог управляться с развитым парусным вооружением, и потому не полагался на активное использование парусов в противостоянии со штормовой стихией. Определяющее значение в обеспечении безопасного плавания имеет специальная форма корпуса, где обводы и надводная архитектура корабля создают режим минимального взаимодействия с разрушительной энергией штормового моря.

В итоге, принимая целью проектирования возможность неограниченно дальнего и длительного океанского плавания, формулируются основные тезисы о форме корпуса и общекорабельной архитектуре парусного корабля повышенной штормовой мореходности:

- *Развитая кормовая надстройка смещает центр парусности надводного борта в корму, а большая ширина и полнота носовых шпангоутов переносит центр тяжести и величины в носовую часть корпуса. Таким образом, на ветру корпус ведет себя подобно флюгеру, обеспечивая штормование носом на волну без хода;*
- *Оборудование ахтерштевня и малая полнота кормовых шпангоутов позволили привести центр бокового гидродинамического сопротивления на одну вертикаль с центром парусности. Это необходимо для достижения устойчивого движения под парусами, а также для повышения эффективности кормового навесного руля;*
- *Для достижения остойчивости значительно уменьшается отношение длины корпуса к ширине (L/B - 3÷4). Тем не менее, для парусного корабля нет необходимости в широкой и непрерывной по длине палубе. Использование волноотталкивающего завала бортов и разделение палубы поднимающимися в корму надстройками исключают попадание на палубу большого количества воды, обеспечивая сохранение штормовой остойчивости. Этот же завал бортов уменьшает риск заливания палубы при ходе корабля под парусами с большим креном и уменьшает интенсивность рыскания на курсе, так как корпус приобретает*

вертикальную симметрию относительно продольной оси, проходящей вдоль ватерлинии;

- *Если при взгляде на кормовую часть средневековый корабль кажется парящим над водой, позволяя ветру без особых усилий приводить его корпус к ветру (т.е. носом на волну), то носовая часть корпуса видится тяжелой и глубоко вдавленной в воду, что необходимо для безударной встречи с набегающими на корпус штормовыми валами волн (в режиме их неразрушительного обтекания). В отличие от современных кораблей бак древнего парусника очень низок, то есть корабелы тех времен совершенно не заботились о незаливаемости на встречном волнении. Единственная защита – это бушприт, княвдигед и гальюн, которые первыми воспринимают встречную волну и несколько деформируют ее фронт, не позволяя сконцентрировать удар на носовой палубе.*

На примерах исторических весельных и парусных кораблей вполне просматривается системный подход к проектированию, как к замкнутой системе инженерно-технических решений, отвечающих принципу непротивления силовому воздействию со стороны морского волнения, обоснованных неформализованными представлениями мореплавателей о хорошей морской практике.

С опорой на исторические проекты кораблей, с учетом реального опыта дальнего мореходства возможно тезисное определение главных принципов непротиворечивого проектирования корабля, при котором могут быть учтены основные технические решения по обеспечению штормовой мореходности и безопасности мореплавания. Это возможно только в том случае, если основные эксплуатационные свойства корабля в достаточной степени изучены и соответственно при любых новациях в архитектуре будущего корабля четко представляются не только достоинства, но все связанные с этим негативные последствия. Если же, хотя бы качественно определяются как достоинства, так и недостатки любых изменений в проекте, то возможна постановка задачи об оптимизации всего комплекса мореходных качеств будущего корабля. Но это возможно только в том случае, если в проектировании

нового корабля непосредственное участие принимают наиболее опытные мореплаватели.

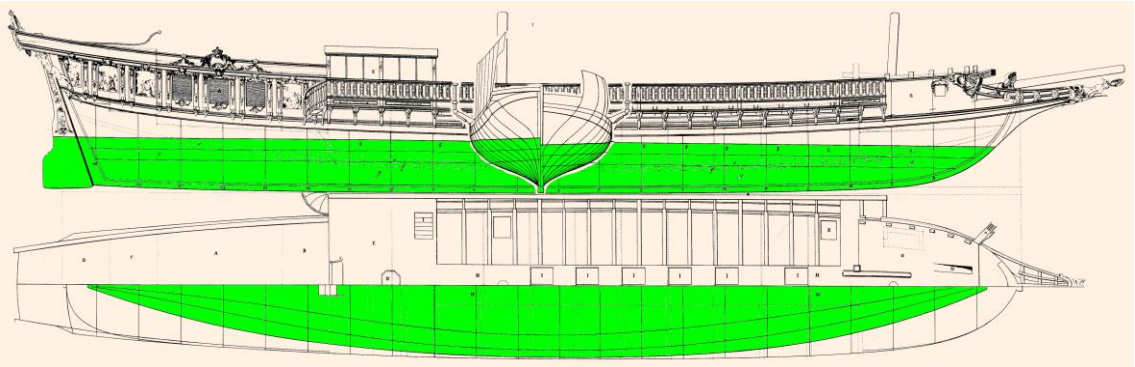


Рис.18. Корпус галеры из альбома чертежей Фридерика Чапмэна «Architectura Navalis Mercatoria», *1768 г. Быстроходный корабль прибрежного плавания прекрасно выполнял роль посыльного или дозорного корабля; обеспечивал охрану морского побережья и боролся с пиратами и контрабандистами, а при подготовке боевых операций основного флота, успешно проводил конвоирование своих кораблей или стремительные разведки дислокации флота противника. Плавности обводов галеры могут позавидовать проектировщики современных скоростных кораблей, а форма корпуса и общекорабельная архитектура в целом, как и эстетическое оформление корабля, подтверждают высочайший технологический уровень средневекового кораблестроения*

Непротиворечивое или оптимальное проектирование может быть разделено на последовательные этапы комплексного изучения технической проблемы, формально образующих направления исследований «сверху вниз» — от общих эксплуатационных требований к кораблю до частных технических решений по его конструкции. Обычно при таком подходе возникают настолько нетрадиционные решения, что их реализация становится возможной только после перестройки всей кораблестроительной промышленности или революционного пересмотра ключевых кораблестроительных технологий, что, конечно, не входит в область реальных познаний старых капитанов. Но все же следуют крылатому выражению кораблестроителя Алексея Николаевича Крылова: *«Теория без практики всего лишь бесплодна, в то время как инженерная практика без теоретических обоснований зачастую – пагубна»*.

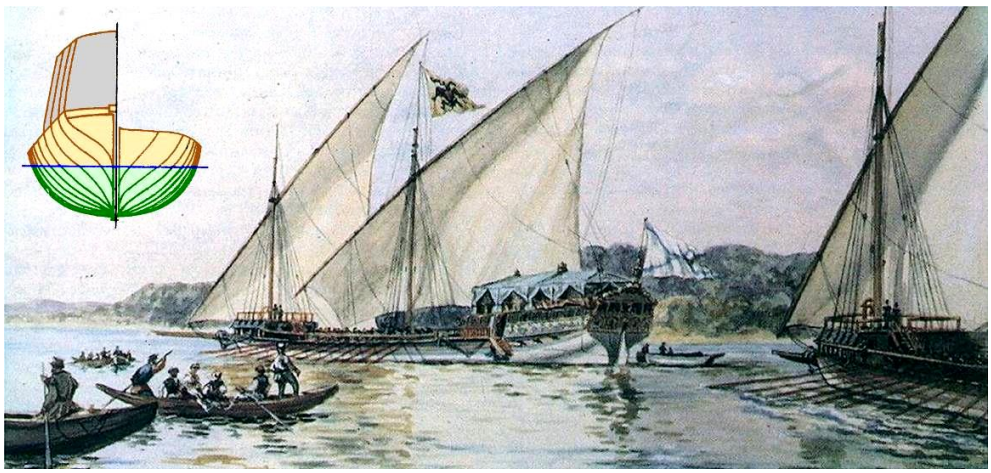


Рис.19. «Галера «Тверь». 1767 г» *(А.К. Беггров). Главным требованием к кораблям охраны водного района остается максимальная скорость хода под парусами, в том числе при встречных ветрах, также как и при безветрии - на веслах. При опасности усиления ветра и волнения до штормового та же быстроходность требуется для скорейшего ухода галеры из открытых морских акваторий под укрытие берега*

В таком случае, до принятия проекта нового корабля, все технические решения пересматриваются по правилу «снизу вверх» — от доступных технических решений к оптимальному кораблю в целом. Комплексное решение задачи непротиворечивой оптимизации возможно только в том случае, если удовлетворены все требования к кораблю как на проходе по логическим этапам «сверху вниз», так и на этапе приведения к существующим технологиям, т.е. в строго обратном направлении «снизу вверх».

Интересующие нас корабли повышенной штормовой мореходности строились в странах Европы, имеющих морское побережье с выходом к Атлантическому океану, а также практически во всех Восточно-Азиатских странах, поддерживавших дальние морские коммуникации на просторах Тихого и Индийского океанов. Если перед мореплавателями ставилась задача длительного автономного плавания в открытом океане, то строились (или модифицировались, на примере подготовки к дальнему походу шлюпов «Восток» и «Мирный») корабли, обладавшие всеми необходимыми проектными особенностями, позволявшими им безопасно штормовать без хода, удерживаясь на курсе носом на волну.

Если же в проектировании флота не возникало активного научно-технического взаимодействия и всестороннего контроля принятых проектных решений между мореплавателями–проектантами и корабелами–технологами, то кораблестроительные недочеты непременно откликались угрозами морских катастроф, и соответственно безвозвратной потерей всех исторических упоминаний о нерадивых корабелах и безвестных моряках, сгинувших вместе с неразрешенными противоречиями морских наук.

Исторически так сложилось, что в зависимости от назначения и района плавания проектируемого корабля, его форма корпуса, движители, так же как и другие общеархитектурные решения, могут иметь заметные внешние различия. Но все же корабли дальнего плавания всегда имели корпуса в форме круглых бочонков с относительно большой осадкой, быстроходные сторожевые галеры оставались с такими же легкими (*с малыми коэффициентами общей полноты*) и идеально обтекаемыми корпусами, и лишь торговые суда озерно-речного или ближнего каботажного плавания, постоянно проходившие через мелководные бары в устьях рек, имели широкие корпуса с малой осадкой.

Расцвет парусного флота и переход к механическому движению

Возвращаясь к вопросам проектирования реальных исторических кораблей, можно отметить, что по мере совершенствования принципов приведения корабля в движение, уже на галерах и парусных кораблях (фрегат «Паллада») отмечаются случаи обеспечения режимов штормового плавания за счет активного использования штормовых парусов, что позволило несколько упростить форму корпуса и архитектурный облик этих кораблей, а также обеспечить существенно лучшие ходовые качества на умеренном волнении (клипер «Катти-Сарк»).

Русский флот создавался под влиянием европейской кораблестроительной школы, которая к тому времени достигла уровня проек-

тирования наилучших по мореходным качествам парусных судов. Кораблями английской архитектуры являлись первый русский корабль «Орел» и построенные на Дальнем Востоке пакетботы «Петр» и «Павел». Основные корабли Петра I относились к голландской корабельной школе [Chapman, 1968], они уже не имели развитой кормовой надстройки и были достаточно высокобортными в носовой части. Это означало, что по аналогии с балтийскими странами кораблестроительная программа Петра I в первую очередь учитывала потребности в обеспечении ближних морских коммуникаций на Балтике.



Рис.20. Фрегат «Паллада» *(рисунок Е. Войшвилло). Многочисленное парусное вооружение красавца фрегата XIX века позволяет поддерживать хороший ход на умеренных и сильных ветрах. Спрямленная палуба корабля свидетельствует о совершенстве техники управления парусами, и уверенного поддержания хода и маневренности даже под воздействием ураганных штормов*

В XVIII веке парусное вооружение достигает абсолютного совершенства, теперь уже нет необходимости решать задачу безопасного штормового плавания только путем проектирования специальной формы корпуса. Для противостояния штормовому волнению и ураганному ветру активно используется парусное вооружение. Мореплавателям ставится задача поддержания заданного курса и максимальной скорости хода даже в условиях очень свежих ветров и умеренных штормов, при которых малотоннажные каравеллы эпохи Великих географических открытий обязательно переходили в режим штормования

без хода. Палуба парусного корабля спрямляется и становится непрерывной, а иногда – почти горизонтальной, как у фрегата «Паллада». Для улучшения маневренности теперь широко используется разнообразное косое парусное вооружение, на слабых ветрах реи прямых парусов удлиняются лиссель-спиртами, а в штормовую погоду судно уверенно держит курс с помощью специальных штормовых парусов, либо используются рифы на нижних парусах для уменьшения их площади.

Если сила урагана превышает возможности экипажа по управлению парусами, то остается радикальное аварийное средство: «фок-мачту - за борт» в качестве плавучего якоря, что превращает штормующий быстроходный парусник в его исторический прототип с парусностью, смещенной в корму за счет оставшихся мачт, и носом, прижатым к воде силой сопротивления буксируемой фок-мачты. К сожалению, современные суда с механическими двигателями не имеют аналогичных аварийных средств, и при этом эксплуатация двигателей и рулевых машин в штормовых условиях зачастую ведется с серьезными или даже опасными перегрузками.

Начало XIX века отмечается строительством первых судов с паровыми машинами. В 1815 г первый русский колесный пароход, который называли стимботом «Елизаветой», встал на линию Петербург – Кронштадт. В 1819 г американский колесный пароход "Саванна" пересек Атлантику от Нью-Йорка до Ливерпуля за 24 дня, пройдя лишь малую часть пути под парусами.

Механический привод значительно повышает мореходность корабля, что обусловлено возможностью поддержания хода произвольным курсом при любом состоянии волнения. Эффективный механический движитель способен преодолевать натиск штормовой стихии, и при небольшом навыке рулевого в динамике лавирования между волнами может спасти от опрокидывания любое, даже самое несуразное плавучее сооружение. Новый двигатель, являясь сложным механическим сооружением, привлек на борт кораблей высококвалифицированных специалистов – механиков, которые в силу своей молодецкой изобретательности стали привносить на флот психологию силового

«покорения» моря, вместо традиционных морских правил непротивления морской стихии.

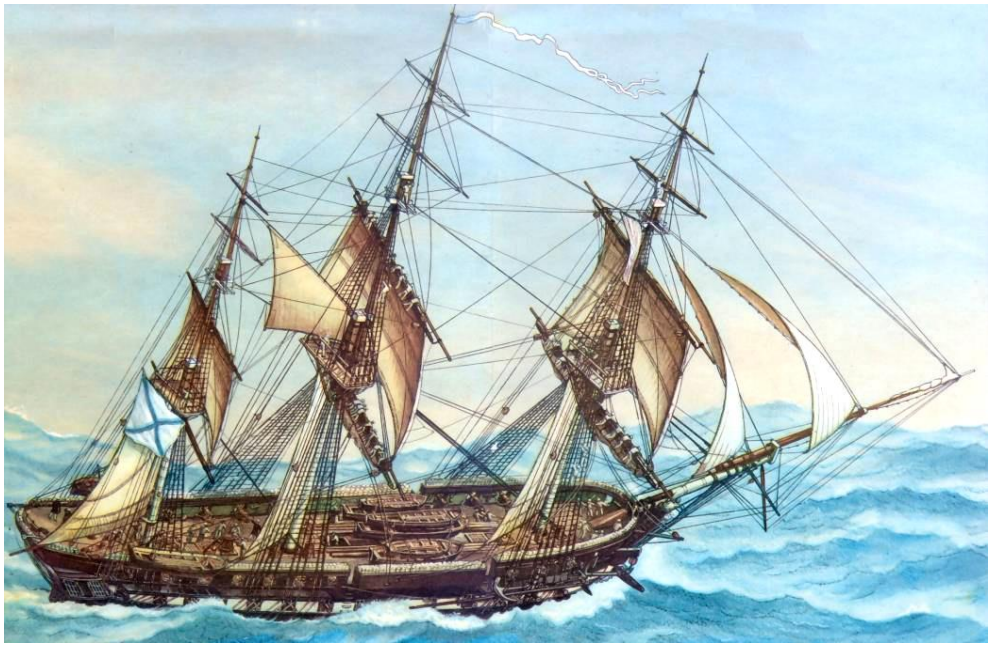


Рис.21. Но все же безопасность штормового плавания фрегата «Паллада» *(рисунок Е. Войшвилло) поддерживается непрерывной активностью парусной вахты. Если корабль теряет управление, то остается возможность срубить фок-мачту и буксировать в качестве штормового плавучего якоря. Грот- и бизань-мачты позволят пассивно ожидать окончания шторма на курсе носом на волну, так же как это позволялось на средневековых галионах за счет специальной формы корпуса и кормовой надстройки*

Но все же, на первых порах требования эффективности и экономичности мореходства довольно быстро привели к появлению новых «неписаных» правил хорошей морской практики, таких же, как и в парусном флоте, составленных с использованием реального опыта штормового судовождения.

Новые океанские корабли всех стран мира довольно быстро приобрели одинаковую внешнюю форму, что является необходимым признаком существования общемировых критериев оптимальности в проектировании корабля, что свидетельствовало также и о едином подходе к обеспечению мореходности корабля на умеренном волнении и в штормовых условиях плавания.

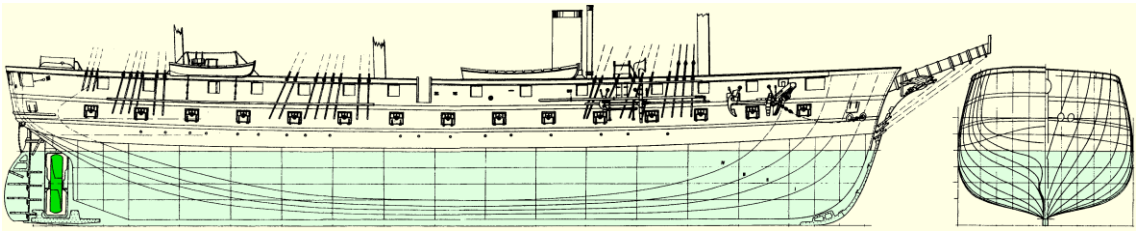


Рис.22. Корпус винтового фрегата «Олег», *построенного в Кронштадте в 1858-1860 гг. «Олег» был одним из последних добротных деревянных кораблей русского военно-морского флота. Двухлопастный гребной винт имел диаметр 5,8 м. При движении под парусами винт отсоединялся от гребного вала и втягивался в колодец, устроенный в кормовом подзоре.*

Гребные колеса устанавливались на парусных судах в качестве дополнительного движителя, а в силу технического несовершенства паровых главных двигателей, такие пароходы приобретали все эксплуатационные недостатки весельного судна:

- *Широкая палуба;*
- *Уязвимость движителя - гребного колеса;*
- *Сложности использования гребного колеса на крупном волнении.*

Первое крупное судно «*Great Britain*», оснащенное гребным винтом, было построено в Бристоле в 1843 году. Затем в течение 50 лет форма корпуса всепогодного корабля претерпевает последовательные эволюционные изменения, которые, тем не менее, всегда и в полной мере наследовали лучшие свойства своих парусных и весельных предшественников.

В обводах корабля, построенного в начале XX века, можно прочитать компромиссные решения между покорностью и противостоянием перед морской стихией:

- *Таран-бульб продолжает служить средством для стабилизации корпуса и сохранения устойчивости на курсе в условиях волнения. Тем более важно, что для высокой скорости хода, по сравнению с галерой на веслах, этот бульб благоприятно сказывается на уменьшении волнового сопротивления и на спокойной воде;*
- *Заострение оконечностей и малая полнота надводных объемов в носу и в корме способствуют ходкости на волнении и благопри-*

ятно сказываются на уменьшении килевой качки и предотвращении слеминга;

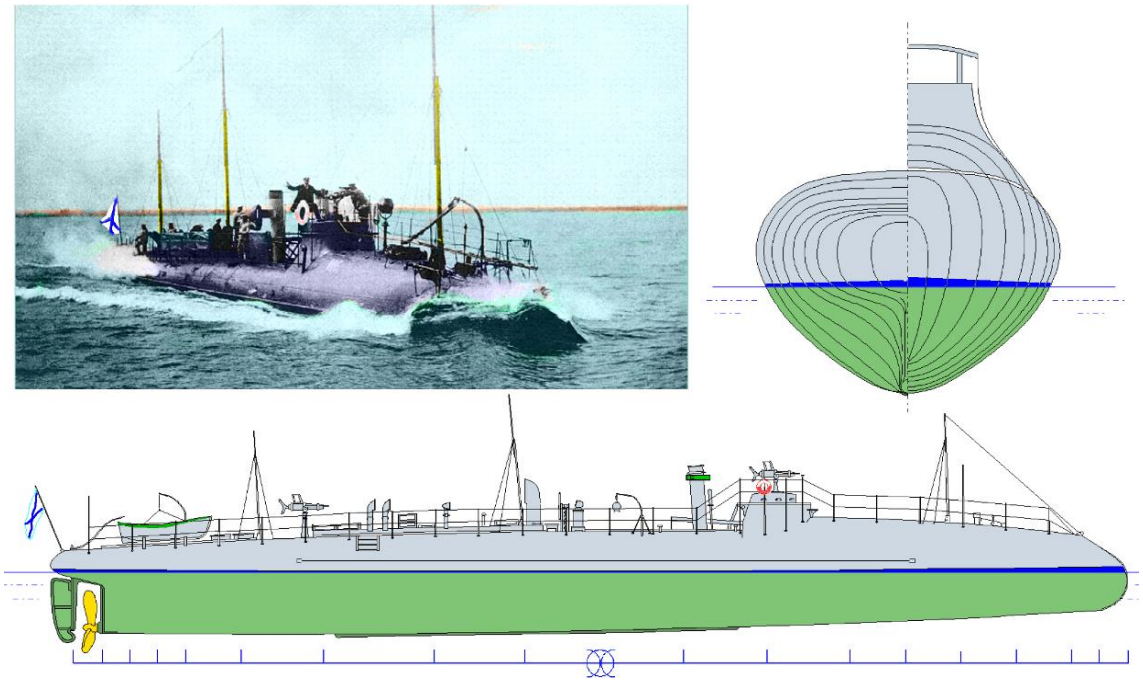


***Рис.23. Миноносец типа «Измаил»**. Корабль пользовался штормовым ходом в режиме прорезания волн. В 1887 г миноносцу устраивались ходовые испытания на 6-бальном волнении, где он, идя навстречу волне и зарываясь по ходовую рубку, показывал 15,5 узла и 17 узлов – при ходе по волне [Мельников, 1981]. По теоретическому чертежу видно, что нос не обладает свойством всхожести на волну; развал шпангоутов под кормовым подзором обеспечивает стабилизацию работы винто-рулевого комплекса в условиях интенсивного волнения*

- *Завал бортов в средней части корпуса предотвращает концентрированные удары волн по надводному борту корабля, а округлый мидель-шпангоут и в целом веретенообразный и симметричный относительно центральной линии корпус не допускают сильного рыскания и потери хода при движении почти любым курсом относительно штормового волнения;*
- *Практически у всех кораблей отмечается срез форштевня под водой ниже тарана, что способствует устойчивости на курсе при накренениях на качке и в то же время позволяет корпусу свободно рыскать при косой встрече с крупными волнами и зыбью;*

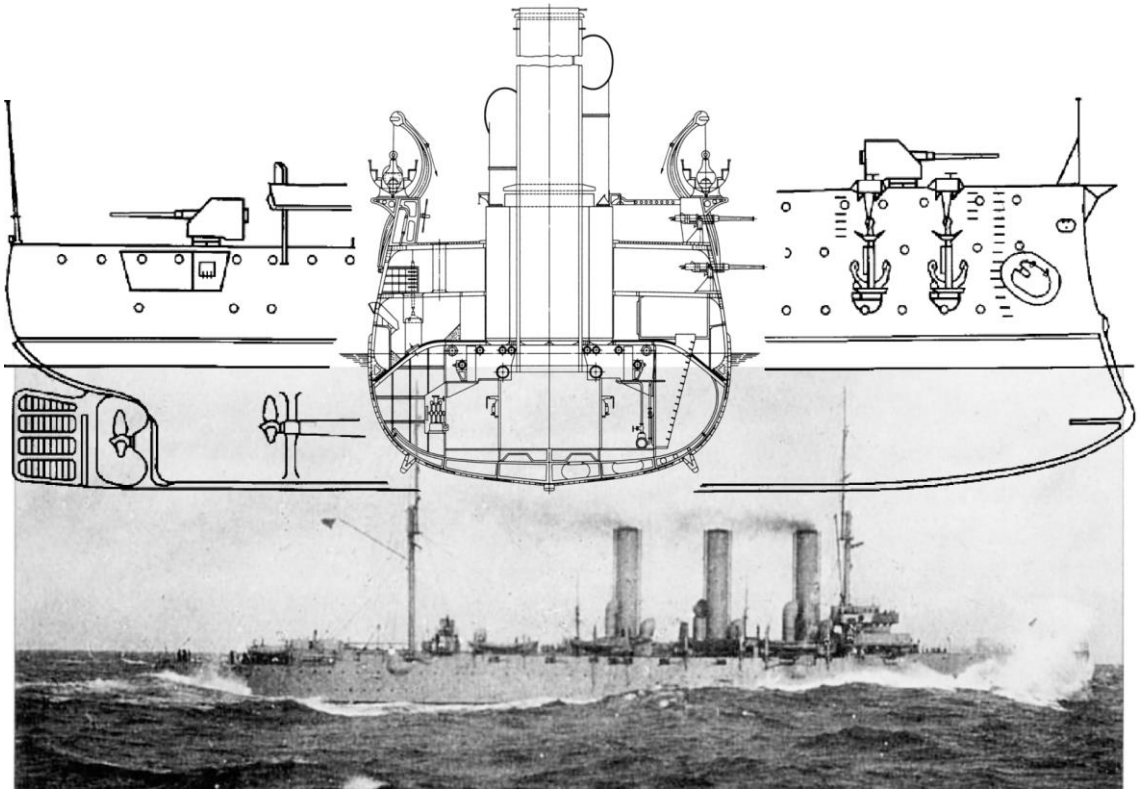


Рис. 24. Крейсер «Аврора» *являет лучший образец инженерной мысли моряков-корабелов начала XX века. Корпус крейсера обладает мореходными свойствами аналогичными обводам миноносца. Их суть – это непротивление штормовой стихии. Надводный объем корпуса относительно велик. Хорошо виден завал надводного борта. На верхней палубе отсутствуют большие непрерывные площади. Внутрикорпусная прочная непрерывная палуба имеет сильную погибь, образующую второй внутренний борт. Как бы ранее строили корабли, если б внутренние объемы корпуса не определялись громоздкостью судовых машин?*

- *Так же, как у средиземноморской галеры, строятся узкие корпуса кораблей для достижения высокой скорости хода;*
- *Зауженная общая ширина палубы и длинные продольные надстройки служат целям сохранения штормовой остойчивости в условиях повышенной заливаемости верхних палуб;*
- *Достаточно низкий надводный борт и малая парусность надстроек дают большие возможности по управлению кораблем и маневрированию в условиях сильных ветров.*



Рис. 25.
Порт-Артурские эскадренные миноносцы
«Внимательный» типа «Форель», построенный во Франции (сверху), и «Бдительный» типа «Кит», спущенный на воду в Германии (снизу). Немецкий проект («Кит») ориентирован на плавание и решение боевых задач в условиях умеренного волнения Балтийского моря и обладает относительно малой осадкой, что требуется для базирования в мелководных балтийских портах и устьях европейских рек, а у французского проекта отсутствует даже открытая верхняя палуба , то есть корабль должен основное время находиться в открытом штормовом море.

Идеальной архитектурой корпуса по всем названным критериям обладали многие эскадренные броненосцы, а также крейсера и эсминцы, построенные в конце XIX – начале XX веков. Не меньшей мореходностью обладали и линейные корабли первой половины XX века, имевшие заниженные и заостренные бак и ют, а основной объем корпуса у них сосредотачивался в средней части. Это обеспечивало устойчивое движение на волнении, при котором не возникало интенсивной килевой качки, и соответственно возможность опасной залива-

емости оконечностей исключалась за счет уменьшения общей площади и непрерывности верхних палуб бака и юта, а также отсутствием фальшбортов и большой погибью палубных бимсов.

Создание нового Российского флота в конце XIX века

Становление нового флота Российской империи ярко персонифицировано с именем адмирала Ивана Алексеевича Шестакова. Близкий ученик и сподвижник М.П. Лазарева, В.А. Корнилова и П.С. Нахимова, получив отличную морскую выучку, участвуя в боевых действиях, а затем командуя Черноморским флотом, он сыграл важную роль в организации экстренного кораблестроения во время Крымской войны и в первые годы после нее, реализуя замыслы великого князя Константина Николаевича – первого председателя Русского географического общества. В 1856 году И.А. Шестаков наблюдал за строительством в США винтового фрегата «Генерал-Адмирал», приняв затем командование этим лучшим в Российском флоте кораблем.

При вступлении на престол императора Александра III был в полной мере востребован морской и кораблестроительный опыт И. А. Шестакова, и в 1881 г он был назначен председателем Кораблестроительного отделения Морского технического комитета, а в 1882 г – управляющим Морского министерства. Призвав для обновления министерства морских офицеров из Военного ведомства, И. А. Шестаков начал реформы кораблестроения с введения положения о морском цензе. Так же, как это происходило ранее при адмирале А. А. Попове, сухопутные корабельные инженеры были низведены на роль безгласных исполнителей, а в кораблестроении перестали приветствовать «наклонности к изобретательству без пользы».

С целью восстановления централизованного управления флотом на равных правах были сформированы Морской ученый комитет (МУК), Морской технический комитет (МТК), Главное управление кораблестроения и снабжения (ГУКиС) и Главный морской штаб (ГМШ). Ввиду отсутствия у России достаточного опыта проектирования и строительства парового океанского флота, Морское министер-

ство ориентировалось на западные прототипы новых кораблей. Во многих случаях И. А. Шестаков сам формулировал задания на проектирование, при его непосредственном участии были определены условия и построены 7 броненосцев, 5 крейсеров, 13 канонерских лодок, 49 миноносцев и 7 минных крейсеров. Достигнутый высокий темп строительства кораблей сохранялся до 1905 г.

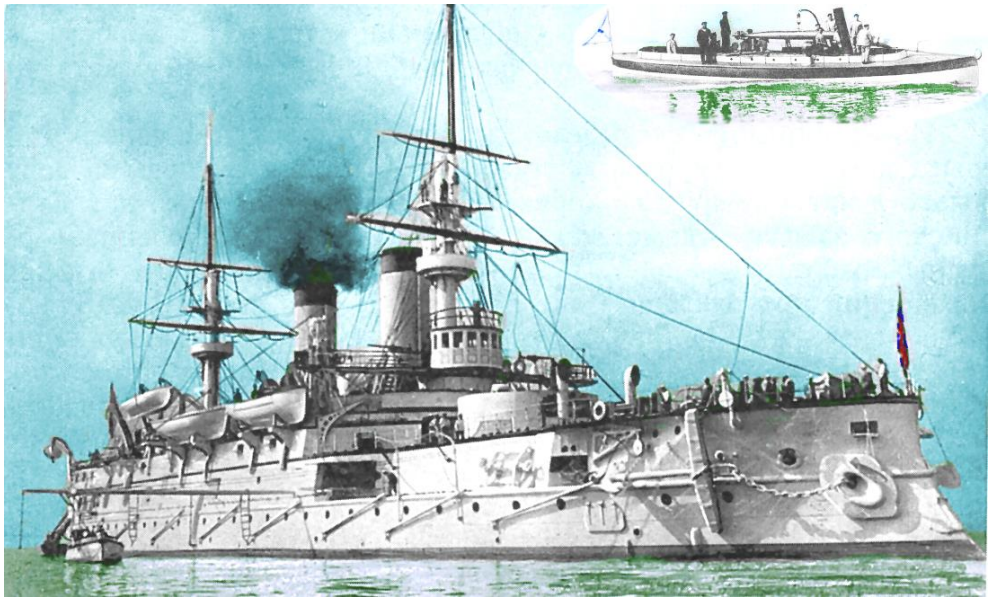


Рис.26. Броненосец «Император Николай I» *построен в 1891 г. на верфи Франко-Русского завода в Санкт-Петербурге. Флагманский корабль командующего соединенными эскадрами Черного моря и Тихого океана вице-адмирала П.П. Тыртова. Вверху справа показан минный катер. В проектировании и строительстве корабля активнейшее участие принимал адмирал И.А. Шестаков. Корабельный инженер Н.Е. Кутейников наблюдал за строительством корабля, и в это время в чине мичмана у него стажировался А.Н. Крылов. Новые российские кораблестроительные технологии рождались вместе с этим замечательным океанским кораблем.*

Несмотря на усиленное внимание к развитию российского кораблестроения, участие в европейской гонке морских вооружений требовало размещения заказов на зарубежных верфях, где по русским проектным заданиям были построены многие известные корабли, такие, как «Варяг» и «Ретвизан» – в Америке, «Аскольд» и «Новик» – в Германии; многочисленные эскадренные миноносцы заказывались в Англии, Франции, Германии и других странах. Разнообразие иностранных кораблей называлось в то время «периодом конструктивной мно-

жественности», что безусловно служило быстрому становлению морского инженерного образования и русского кораблестроения в целом.

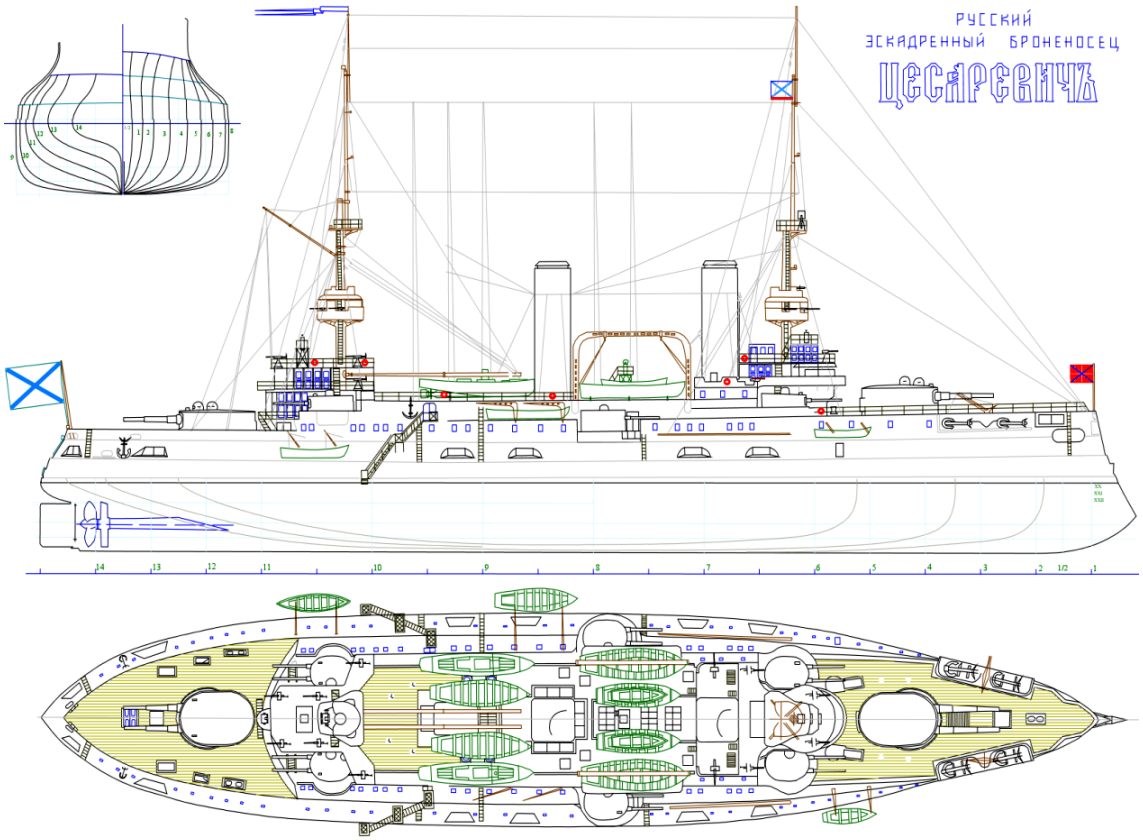


Рис.27. Эскадренный броненосец «Цесаревич», *первый корабль крупной серии типа «Бородино». При водоизмещении 13 тыс.т на мерной миле достигал скорости хода 18 узл. Несмотря на величайшие технологические сложности в кораблестроении того времени, в ущерб эксплуатационным требованиям по обслуживанию громоздких артустановок, угольных котлов и паровых машин, форма корпуса этих кораблей обеспечивала наилучшую штормовую мореходность и удовлетворяла всем требованиям снижения качки, достижению ходкости и устойчивости на курсе в условиях штормового океанского волнения*

Лучшие иностранные судостроительные компании рассматривали проектные задания Морского министерства, и получали право на строительство кораблей Российского Императорского флота только по результатам строгого конкурсного отбора, проводившегося при участии авторитетнейших русских адмиралов, имевших реальный ценз морского плавания и командования флотом. При таком распределении заказов флот пополнялся не просто новыми кораблями, а современными образцами судостроения лучших «кораблестроительных школ». Участие морских офицеров и корабельных инженеров в всех этапах

подготовки проектных условий, проектировании, постройке и испытания кораблей, способствовало развитию технических наук, тяжелой промышленности и российского океанского мореплавания.

С 1898 г управляющим Морским министерством становится вице-адмирал П. П. Тыртов, в полной мере поддерживавший реформы адмирала И. А. Шестакова. К этому времени в России рассматривались только проекты кораблей океанского плавания повышенной мореходности, что объяснялось приоритетностью пополнения флота Тихого океана. В продолжение программы интенсивного строительства океанского флота рассматривались также и российские проекты эскадренных броненосцев, к которым морские офицеры относились как к неудачным попыткам усовершенствовать старые неуклюжие и немореходные броненосцы береговой обороны.

26 мая 1898 г конкурс на проектирование и строительство нового океанского корабля выиграл блестящий проект директора завода французской фирмы «Форж э'Шантье» А. Лаганя. Великим князем Алексеем Александровичем было приказано «теперь же заказать фирме броненосец по этому проекту» и «выговорить в контракте доставление детальных чертежей по корпусу и механизмам для постройки таких же типов в наших Адмиралтействах». Контрактом оговаривалось выполнение брони по способу Крупа, что существенно повышало боевые качества корабля.

С использованием французского опыта параллельно строительству эскадренного броненосца «Цесаревич», на Санкт-Петербургских верфях было развернуто строительство лучших в мире океанских кораблей типа «Бородино». Вместе с «Цесаревичем» на заводе А. Лаганя был заложен крейсер «Баян», который после русско-японской войны также был признан превосходящим аналогичные корабли российской постройки типа «Диана» и немецкие типа «Аскольд».

С конца 1898 года, после кончины императора Александра III, на всех заграничных верфях стали обостряться отношения между строевыми офицерами и прикомандированными им в помощь корабельными инженерами. Так, первый ректор Кораблестроительного института К.П. Боклевский жаловался на капитана 1-го ранга И.К. Григоровича,

что корабельные инженеры низведены до роли указателей, «отвечающих за качество клепки и чеканки».

Начинавшаяся демократизация в обществе позволила начальнику Балтийского завода отстоять свое право на выполнение большого объема проектно-конструкторских работ по броненосцам типа «Бородино». После поражения Российского флота под Цусимой между морскими офицерами и корабельными инженерами размежевание усилилось, а в 1905 года был отменен морской ценз на занятие должностей в Морском министерстве.

Во многом вынуждаемая необъективными обстоятельствами и внутренними неурядицами, Россия обрела собственные пути проектирования и строительства океанского флота. Конечно же, международное взаимопроникновение морских идей и кораблестроительных технологий на этом новом пути ни сколь не ослабло, однако флотские акценты их осмысления со временем все боле угасали в тиши кабинетов «морских» береговых инженеров.

О гидродинамических особенностях кораблей конца XIX – начала XX веков

В дальний поход 2-й Тихоокеанской эскадры в 1904-1905 годах, в помощь корабельным механикам, вице-адмирал З.П. Рожественский брал заводских инженеров-кораблестроителей. Так, на броненосце «Орел» в походе и бое участвовал молодой корабельный инженер Владимир Полиевктович Костенко, который во время сильнейшего шторма у южной оконечности Африки в декабре 1904 года отмечал «странное явление» – четыре броненосца типа «Бородино» взмывали и проваливались между десятиметровыми океанскими валами, *практически не качаясь*, в то время как крейсер «Аврора» раскачивался *с борта на борт (всего лишь)* градусов на 20! В. П. Костенко отмечает, что столь различное поведение кораблей не объяснялось особенностями остойчивости или весовой нагрузки (*метацентрическая высота у броненосца и крейсера была примерно одинаковой и составляла порядка 70 см.*)

Наблюдения за ударами волн о борт броненосца «Орёл» с правого крыла среднего мостика показали следующую картину: очередной океанский вал настигает корабль и налезает на борт, иллюминаторы кают-компании и офицерских кают скрываются под водой, затем волна наваливается на срез верхней палубы и заливает ее так, что средняя (152 мм) башня кажется торчащей прямо из воды. От такого удара в правый борт, по представлениям В. П. Костенко, корабль должен был бы качнуться резко влево, но вместо этого «Орел» не только сохраняет вертикальное положение, но даже чуть кренится на правый борт! Столь «неожиданное» открытие корабельный инженер связывал именно с особенностями формы надводного борта броненосца: крутым завалом бортов выше броневого пояса и у верхней палубы, а также открытыми срезами вдоль бортов по носу и корме.



Рис.28. Крейсер «Аврора» *на переходе в шторм*

С приобретением механического двигателя крупные корабли снова обрели способность активно маневрировать в условиях штормового волнения, *подобно небольшим судам древности, управляемым с помощью кормовых весел–плавников*. Движители современных кораблей способны развивать достаточные мощности для движения при любом состоянии моря, что при исправной работе машин может сделать судно в полной мере готовым к встрече со штормовой стихией. При определенной опытности рулевого и достаточной надежности двигателей, в условиях работы с большими перегрузками, корабль может противостоять ударам штормовых гребней волн.

Но все же эти режимы штормового хода не представляют особого интереса, так как они не отвечают требованиям безусловной безопасности мореплавания, и при поломке рулевой машины или остановке главного двигателя корабль может оказаться в бедственном положении, подобно неуправляемому самолету.

Важнее отметить, что в отличие от исторических гребных и парусных кораблей на современном флоте используются абсолютно идентичные движители. Это гребные винты и стоящие за ними навесные рули. Что совершенно нельзя сказать о форме корпуса или архитектурном облике современных кораблей и судов, даже в случае их абсолютно одинакового назначения. Не является ли это свидетельством частичной потери единого системного подхода к достижению наилучшей мореходности, так как оптимальные проектные решения в технике никогда не отличались слишком большим разнообразием?

Поэтому представлялось актуальным рассмотреть особенности мореходных качеств кораблей с существенно отличными судовыми обводами и принципиально разной общекорабельной архитектурой. Так, физико-геометрический анализ взаимодействия корпуса корабля с «трохоидальным» морским волнением показывает существенные гидродинамические преимущества корпуса крейсера "Аврора" в сравнении, к примеру, с ракетным крейсером "Варяг".

Приведенный здесь схематический рисунок с распределением гидродинамических сил волновой природы не оригинален, его на лекциях по морскому делу показывал преподаватель (рис.29), капитан дальнего плавания Г. С. Маленко на курсе морского дела Калининградского мореходного училища в 1975 году.

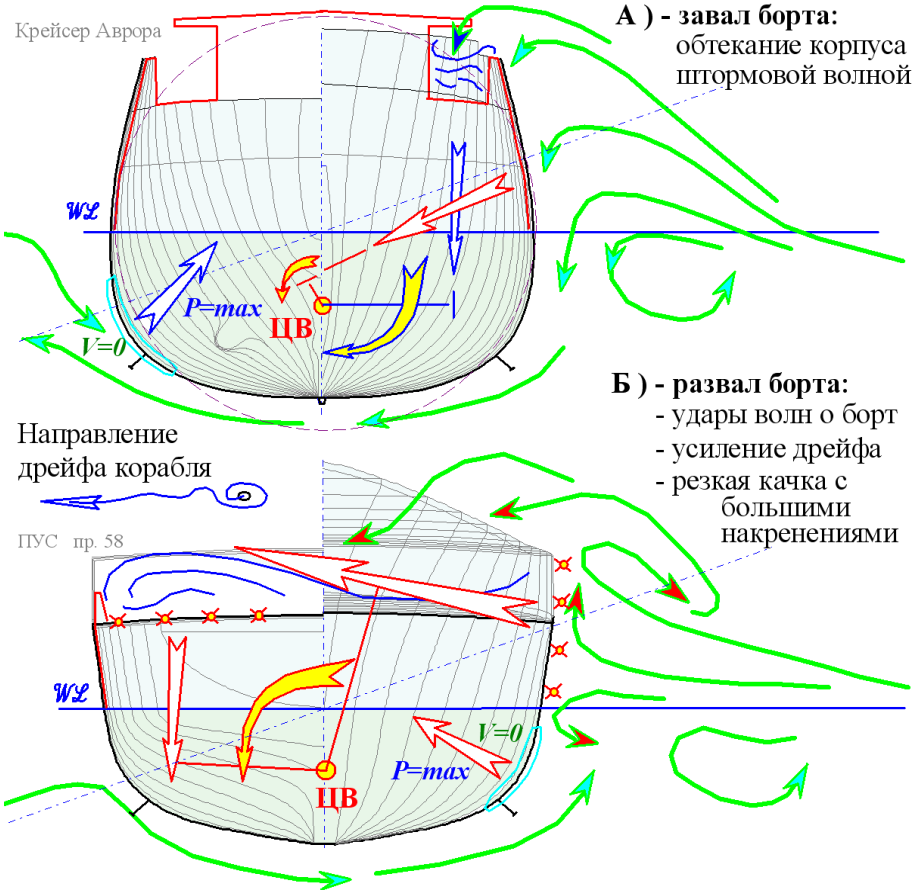


Рис.29. Схематический рисунок, иллюстрирующий характер воздействия морского волнения на корпус корабля, подтверждает принципиальные различия в перераспределении кренящих гидродинамических сил для исторических кораблей конца XIX века и для современных кораблей постройки середины - конца XX века. *На схеме А показано, что крен от прямого воздействия гребня волны на надводный борт корабля может быть минимизирован с помощью завала борта, а длинная вдолькорпусная надстройка на верхней палубе, округлость шпангоутов и бортовые кили в этом случае, и только при условии завала надводного борта, смогут частично скомпенсировать остаточный кренящий момент от воздействия ветра и волнения. Если же корпус имеет развал бортов (схема Б), то и бортовые кили, и распределение давлений в подводной части корпуса будут усиливать кренящий момент под воздействием морского волнения. Над палубой окружность средних шпангоутов может обобщенно дополняться (замыкаться) за счет вытянутой вдоль корпуса надстройки, которая не позволит перетекать массе воды, попавшей на палубу, с одного борта на другой. Удержав попавшую на палубу воду на наветренном борту, суммарный кренящий момент может быть уменьшен, и наоборот, если масса воды по «плоской» палубе перейдет на противоположный борт, то возникнет дополнительный и неблагоприятный (точнее, опасный) кренящий момент.*

Судоводители знали и не скрывали этого несложного "неписаного правила морской практики", довольно важного для обеспечения хорошей мореходности и безопасности штормового плавания корабля. Даже небольшой завал надводного борта в средней части корпуса благоприятно влияет как на уменьшение бортовой качки, так и на снижение заливаемости верхней палубы, что в первую очередь обуславливается особенностями гидродинамического непротивления или соответственно ослабленного воздействия преграды – корпуса на форму и динамику движущихся на него гребней штормовых волн.

Надвигающийся на корпус корабля гребень волны несет потоки воды со скоростью превышающей фазовую скорость распространения этой волны. Если надводный борт завален внутрь корпуса, то в точке встречи с судовой обшивкой жидкость в гребне волны успевает приобрести направленную вниз составляющую скорости, которая способна увлечь весь поток воды из гребня волны под днище, и тогда волна может проявиться на противоположной стороне корпуса корабля с минимальными искажениями формы ее изначального фронта. Аналогичная форма мидель-шпангоута, как бы вписанного в окружность, использовалась также и на парусных кораблях, предназначенных для океанского плавания, критерии остойчивости у которых изначально ставились существенно выше, чем у судов с механическим двигателем, и, тем не менее, возможность увеличения ширины ватерлинии при больших углах крена за счет расширения верхней палубы не использовалась (*как у парусного галиона «Голден Хинт»*).

Под воздействием бортового ветра и волнения корпус корабля получает заметный боковой дрейф, который усиливается еще и оттого, что в подошве волны скорость жидкости направлена навстречу волнению, отчего судно получает постоянный кренящий момент. В таком режиме бортовые кили только ухудшают условия плавания судна лагом к волне, а применение таких успокоителей качки на парусниках вообще нецелесообразно. Однако, если за счет завала бортов под днище будет увлекаться поток жидкости из гребня волны, то бортовые кили действительно смогут создать небольшой восстанавливающий момент сразу же после удара крупной штормовой волны в борт

корабля. В случае же развала надводного борта, поток из гребня волны не увлекается под днище и, отталкиваясь от корпуса, увеличивает скорость бокового дрейфа корабля, а бортовые кили в таких условиях могут способствовать только ускоренному опрокидыванию.

Для поиска математического подхода к минимизации сил взаимодействия корпуса корабля с волнением, показанный выше гидродинамический процесс можно формализовать: необходимо добиться такого обтекания корабля штормовыми валами, чтобы подходящий к корпусу фронт трохоидальной волны проявлялся затем с противоположного борта с минимальными искажениями. Таким образом, облегчение перетока волновой энергии под днищем корпуса корабля, то есть обеспечение перетока жидкости в момент прохождения гребня волны на подветренный борт, а в подошве волны – обратно, является основным условием снижения энергии взаимодействия корпуса корабля и штормового волнения.



***Рис.30. Эскадренный броненосец «Цесаревич»**. Основным признаком хорошей штормовой мореходности является плавность качки, свидетельствующая об отсутствии резкого воздействия волн на корпус корабля. Все другие свойства корпуса, как заливаемость палуб, рыскание или ходкость и маневренность на тихой воде, могут быть оп-*

Можно отметить гидродинамическую особенность затягивания жидкости из гребня волны под днище корпуса, который в любом случае будет заторможен встречным потоком в подошве волны. В точке остановки этого потока образуется повышенное давление на обшивку корпуса, и если это происходит с подветренного борта, то скорость накренения под воздействием волны замедляется. При отражении же волны от наклоненного наружу борта, остановка дрейфового потока под днищем происходит на наветренном борту – качка усиливается.

Другую «гидростатическую особенность» успокоения качки за счет завала бортов в средней части корпуса, которую кораблестроитель В.П. Костенко называл «надводным бортовым килем», на том же броненосце «Орел» он отмечал как препятствующий накренению момент, образуемый удерживающейся на наветренном борту массой воды. Однако и для достижения такого эффекта успокоения качки также необходим завал борта, чтобы гребень волны безударно попадал и удерживался на верхней палубе с наветренной стороны (без перетока с остановкой у подветренного фальшборта). С этой целью верхняя часть окружности средних шпангоутов дополнялась длинной палубной надстройкой по диаметральной плоскости корпуса.

Если форма корпуса корабля и его весовая нагрузка хорошо оптимизированы для плавания в штормовом море, то, как это обычно происходит в искусственно оптимизированных системах, небольшие отклонения от проектной нагрузки или посадки корабля могут привести к вполне заметным отклонениям от должной мореходности. В этом случае знание экипажем особенностей штормовой гидродинамики может позволить найти решение по изменению хода и курса корабля или по небольшому перераспределению балласта, чтобы вновь оптимизированный корпус вернулся к оптимальному режиму штормового плавания или к наилучшему выполнению поставленных перед кораблем задач.

В том же походе на «Орле» В.П. Костенко провел очень показательный эксперимент по успокоению килевой качки, возбуждаемой попутными океанскими валами, двигавшимися вдвое быстрее самого броненосца. Расстояние между гребнями волн было примерно на одну четверть больше длины корпуса, и собственные колебания броненосца иногда не совпадали с фазой очередной настигающей его волны. Тогда на стремительно погружающуюся корму сзади надвигалась многотонная водяная гора и создавалась ситуация особо тяжелая для всплытия броненосца. Широкая корма в этих случаях, стряхивая с себя потоки воды, поднималась быстрее, чем острый нос, который полностью зарывался в уходящую волну. От этой неравномерности всплытия кормы и носа броненосец терял устойчивость на курсе, начинал рыс-

кать. В.П. Костенко было предложено принять 200 тонн балласта в кормовой танк, расположенный в междудонном пространстве от 77-го до 87-го шпангоута под кормовой 12-дюмовой башней главного калибра. Как только приказ командира о затоплении междудонного отсека был исполнен, отчего нос подвсплыл почти на 2 фута (0,6 метра), корабль перестал рыскать, что сразу облегчило удержание курса в кильватерном строю.

К транспортным паровым судам, ввиду громоздкости и малой мощности главного двигателя, не предъявлялось специальных требований по ходкости в штормовом океане. Судно имело заостренный вертикальный форштевень и округлую нависающую над водой корму. В случае штормовой погоды судно должно было взять курс носом на волну и удерживаться на нем с помощью двигателей до улучшения погоды.

Но все же наблюдения В.П. Костенко за поведением в штормовом море в общем-то тихоходного броненосца «Орел» дают основу для отличного технического решения не только по безопасности плавания на крупном волнении, но также и по архитектурному оформлению корабля с полными обводами, для которого активное плавание и решение поставленных задач в штормовом океане является основным назначением. Так, если форму корпуса броненосца типа «Бородино» будет иметь спасательный буксир или гидрографическое судно, то:

- *сильный завал борта в средней и кормовой частях корпуса существенно облегчит спасение людей по тревоге «человек за бортом»;*
- *округлая форма мидель-шпангоута и сгруппированные к диаметральной плоскости верхние надстройки позволят существенно более безопасно швартоваться к судну, терпящему бедствие в штормовом море, а также подавать на него водоотливные или пожарные шланги и другие спасательные коммуникации;*
- *незначительная собственная бортовая и килевая качка, а также сниженная скорость бокового дрейфа позволят швартоваться или удерживаться с наветренного борта от спасаемого судна;*

- *существенно сниженные вертикальные перемещения юта, обусловленные малой килевой и вертикальной качкой, а также отсутствие эффекта захвата корпуса штормовыми валами, приводящего к быстрым изменениям скорости хода и тяги на буксирном гаке, позволят избежать излишне сильных рывков буксирного троса;*
- *завал бортов в зоне работы экипажа на верхних палубах, к примеру, занимающегося заводкой буксирных тросов или принимающего забортные грузы, послужит существенному повышению безопасности людей. В этом случае, если штормовые гребни волн и попадают на верхнюю палубу, то они уже не имеют стремительной скорости перемещения на противоположный, да еще и накрененный борт;*
- *уменьшение общей и непрерывной площади верхней палубы, достигаемое за счет завала бортов, не позволит задерживаться на палубах большим объемам воды от набегающих штормовых волн, упростит борьбу с обледенением и в целом улучшит условия работы экипажа на верхних палубах во время штормов.*

Можно также отметить своеобразный недостаток корпуса корабля, в архитектуре которого за счет завала бортов реализован принцип непротивления волновой стихии. Такой корабль не сможет защитить от интенсивного волнения шлюпки и другие мелкие суда, подходящие к нему с подветренного борта, так как устремляющиеся под корпус потоки энергии штормовых волн, создадут и там столь же интенсивные изменения уровня воды, как и с наветренного борта. Однако к «старым» кораблям шлюпки и более крупные баркасы обычно не швартовались непосредственно к борту, удерживаясь от него на некотором удалении с помощью забортных выстрелов. Грузы в этом случае снимались обычными стрелами, а люди поднимались на борт по трапам или шкентелям с мусингами, закрепленным на специально оснащенных для этого выстрелах.

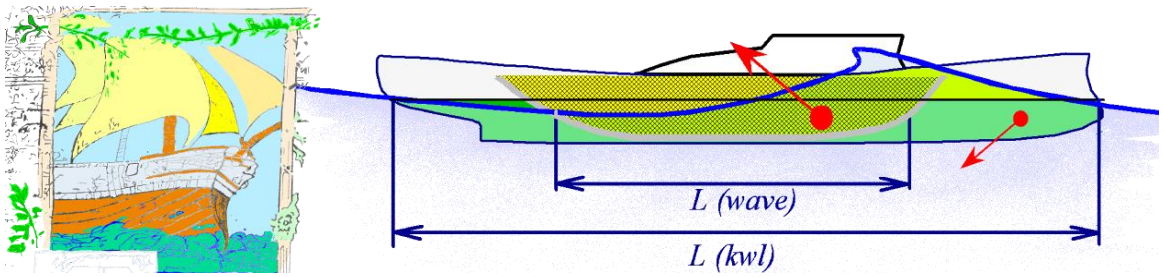


***Рис.31. Корабль Марко поло и схема воздействия на корабль встречного волнения**, показывающая динамические особенности качки, связанные с формальным понятием волнообразующей – волновоспринимающей длины корпуса корабля, при его взаимодействии с «правильной» прогрессивной штормовой волной. L(kwl) - длина корпуса по ватерлинии. L(wave) – длина корпуса, на которую оказывает прямое воздействие встречное морское волнение. Если L(wave) будет заметно меньше длины корабля L(kwl), то оконечности корпуса будут успокаивать килевую качку за счет нарушения структуры волнового потока в скуловой и в средней частях корпуса, а также снизят реакцию корпуса за счет общего увеличения моментов инерции массы корпуса.*

Можно предположить, что возврат к использованию выстрелов для работы со шлюпками послужит расширению штормового диапазона использования бортовых плавсредств в целом. Этому будет способствовать уменьшение бортовой качки корабля с заваленными бортами, а качка все же является большей опасностью при проведении операций по спуску-подъему шлюпок, чем бурлящая за бортом вода. Важно также заметить, что в практике экспедиционных работ рыбопромысловых судов (как и в эскадренном плавании кораблей) шлюпочные сообщения между судами являются довольно важным элементом повседневной деятельности флота, а повсеместно используемая ныне швартовка шлюпок непосредственно к вертикальному борту судна несет неожиданные опасности шлюпочным командам.

Аналогичные эмпирические заключения по наилучшей форме корпуса можно сделать и в отношении килевой качки. Если на парусных кораблях носовая оконечность делалась очень полной в подводной части и с очень низким надводным бортом в районе бака, то это означало, что для борьбы с килевой качкой увеличивался момент инерции массы корпуса, который в силу необходимости сохранения продольной прочности не обеспечивался свойством всхожести на волну. То есть уже на средневековых парусных кораблях успешно

обеспечивали минимизацию килевой качки и соответственно – общую стабилизацию корпуса в условиях интенсивного штормового волнения. *Именно килевая качка приводит к невыносимым условиям обитания экипажа на корабле, но еще большую опасность она представляет потому, что при неконтролируемом изменении гидродинамических условий взаимодействия корпуса с морским волнением может произойти захват корпуса волной с его быстрым разворотом относительно фронта штормовой волны и последующим опрокидыванием.*

Для современного быстроходного корабля повышенная полнота носовой оконечности недопустима. Это сильно сказывается на ходовых качествах. Однако ничто не мешает сместить дифферентующие силы, создаваемые гребнями штормовых волн, ближе к средней части корпуса. Для этого необходимо уменьшить полноту надводного борта в оконечностях корабля и обеспечить хорошую обтекаемость корпуса на скорости хода, при которой длина корабельной волны соизмерима с длиной корпуса (*объяснение ниже*). В этом случае дифферентующие силы при встрече корабля с гребнями штормовых волн будут преобразовываться в силы всплытия, которым корабль будет противопоставлять инерцию всей массы своего корпуса.

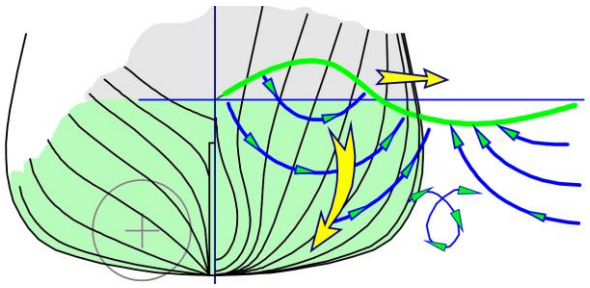


***Рис.32. Геометрическая интерпретация расходящейся корабельной волны** с помощью вихря, рождаемого вблизи судовой обшивки. Изображены линии тока в районе отрыва расходящейся волны от поверхности корпуса. Аналогичный процесс перераспределения волновых потоков происходит при столкновении корабля с гребнями штормовых волн.*

При формальном рассмотрении процесса пассивного демпфирования килевой качки можно сделать заключение, что она зависит от своеобразной «волновоспринимающей» длины корпуса, которая одновременно является «волнообразующей» при рассмотрении процес-

сов волнообразования корабля на различных скоростях хода на спокойной воде.

В носовой части корпуса происходит группирование (сложение) расходящихся волн, которые не могут оторваться от корпуса ввиду малой скорости их распространения. Отрыв корабельных волн с малым периодом происходит только после того, как их амплитуда вырастет до такой степени, чтобы соответствующее увеличение длины достигло бы величины, когда скорости свободного движения этой поверхностной волны, суммировавшей весь высокочастотный спектр корабельного излучения, будет достаточной для отрыва от корпуса. Если в этой области потока создать как бы “закручивание” линий тока в обратную сторону, то, вероятно, произойдет гашение амплитуды расходящейся волны. Таким простым способом можно объяснить влияние бульба на носовую подпорную волну при движении судна с относительно малой скоростью. Аналогичный процесс будет происходить при взаимодействии корабля со встречным морским волнением, что как раз и должно обеспечивать динамическое перемещение сил всплытия на волнении ближе к средней части корпуса. Главное, чтобы у корпуса не было сильного развала надводных ветвей носовых шпангоутов, которые способны напрямую воспринимать силовые нагрузки от гребней штормовых волн, даже еще не ослабленных сложными взаимодействиями волновых потоков с гладкой обшивкой корпуса или, по крайней мере – княвдигедом, как у старых парусных кораблей.

Килевой качки, также как и вертикальной, невозможно избежать полностью, поскольку их проявление является результатом прямого воздействия на корпус корабля со стороны морского волнения. Однако нет необходимости ее и усиливать, как это делалось ранее на приспособленных к штормованию лагом к волне судах викингов.

Смысл визуальных наблюдений за ударами волн о корпус реального судна, так же как и при испытаниях моделей с оптимизированными корпусами, состоял в том, что наибольшую ширину ватерлинии и объем надводного корпуса, отвечающих за всплытие на волнении (в безбульбовом варианте - основной объем подводной части корпуса),

необходимо сосредотачивать в его средней части, что должно обеспечивать динамически уменьшенную длину корпуса. Это позволит перенести силовое воздействие встречных волн ближе к средней части корпуса и частично перераспределить пары сил (дифферентующих моментов) в силы, направленные на всплытие и погружение корпуса, или превратить сильную килевую качку в умеренную – вертикальную.



***Рис.33. Французский корабль «Лафайет»**, имеющий относительно скромный развал бортов в районе форштевня по сравнению с современными российскими кораблями, встречается с волной при относительно умеренном волнении моря. Удар гребня встречной волны о выступающий вперед форштевень может иметь сокрушительные последствия. Такой удар может произойти даже при движении по относительно пологой океанской зыби.*

Килевой качки, видимо, невозможно избежать полностью, ибо пока не найдено соответствующих простых проектно-технических решений. Однако остаточную килевую качку можно гасить силами демпфирования в районе скуловых шпангоутов, которые из условий оптимизации ходкости на тихой воде должны иметь довольно сложную форму, приводящую к своеобразному затягиванию (*закручиванию*) под днище набегающего потока, что способствует гашению расходящейся корабельной волны. Оптимально построенные скуловые обводы корпуса позволяют также снизить активность взаимодействия со штормовыми волнами, соизмеримыми с размерами скуловой части

корпуса, а также при встрече с более крупными гребнями волн, когда корабль пытается поддерживать высокую скорость штормового хода.



Траулер идет малым ходом курсом вразрез волне. Впереди виднеются аномально высокие девятые валы

Волна приблизилась к траулеру, и экипажу может показаться, что ее высота выше ходового мостика



Эта крупная волна лишь вскользь задевает форштевень, при этом нос не взлетает вверх, а падает под удар следующего гребня волны

Однако, стоячая волна больше не движется вперед и теперь подбрасывает вверх корму, оголяя винты и рули траулера



В следующий момент «качели» девятого вала ставят корпус траулера на ровный киль

И траулер, разгоняясь, встречает ходом новую подвижную волну, но она уже имеет меньшую высоту

Рис.34. Испытания на волнении *модели корпуса траулера, имеющего форму корпуса, как у крейсера «Аврора».*

В заключение необходимо также сказать о важных особенностях наиболее крупных и крутых морских волн – девятых валов, которые всегда присутствует в открытом море и наиболее активны в процессе свежего или усиливающегося волнения. Девятые валы всегда проявляются группами из двух-трех волн и обладают очень малой подвижностью. Самые грозные с виду волны не могут нанести бокового удара по корпусу неподвижного корабля, но могут резко подбросить его

вверх или опустить вниз, причем если на вершине таких волн образуются обрушающиеся гребни, то «подбрасывания» и «опускания» оконечностей корпуса могут легко превысить ускорение свободного падения.

Полный пакет образуют также 3-4 быстрых гребня прогрессивных волн, попарно опережающих и догоняющих девятые валы. Эти волны способны наносить сокрушительные удары по скулам корпуса, и чем лучшей всхожестью на встречную волну будет обладать корпус корабля, тем чаще такие «быстрые волны» будут прокатываться сокрушительными потоками по его носовым палубам.

«Быстрые волны» сменяются кратковременным затишьем, имеющем протяженность порядка 2-3 волн с характерными для волновой структуры периодами. В этот момент судоводитель имеет возможность встать на обратный курс, или вырваться их жесткого объятья штормовых волн, если судно, потеряв управляемость, будет поставлено штормом лагом к волне.

Знание указанных особенностей штормового волнения в открытом море позволяет мореплавателям уверенно удерживать судно даже в условиях ураганных штормов, а иногда – требовать от рулевого обеспечения приличной обитаемости для экипажа. Но все же штормовая мореходность в не меньшей степени должна обеспечиваться мореходными качествами корабля, особенностями обводов корпуса и архитектурным обликом, не вступающими в жесткие контакты с сокрушительными волнами и ураганными ветрами.

О современных проектных решениях

Считается, что на архитектуру современных кораблей наибольшее влияние оказали «кораблестроительные уроки Цусимы». Под руководством А. Н. Крылова, а затем И. Г. Бубнова в опытовом бассейне в Петрограде проводились экспериментальные работы по совершенствованию научных методов оценки ходовых и мореходных качеств проектируемых кораблей [Хмельнов и др, 1996]. Однако особое внимание стали уделять непотопляемости и живучести корабля в боевых

условиях, а ходовые испытания ограничивались опытами по достижению максимальной скорости хода на тихой воде.

Реалистичные испытания штормовой ходкости и качки корабля в новом большом опытовом бассейне оказались затруднительными, так как в отличие от гравитационной тяги малых бассейнов, позволявшей моделям изменять ход под ударами волн, буксировочная тележка «прорывала» испытываемые модели сквозь гребни волн с фиксированной скоростью, что лишало экспериментаторов возможности делать объективные оценки особенностей формы корпуса при его силовом взаимодействии с гребнями волн.

С учетом потребностей в увеличении надводных объемов корпуса для размещения вооружений, форма корпуса корабля начала изменяться в сторону завышения надводного борта, что сказывалось на изменении традиционного штормового плавания в режиме «прорезания волн», так как корабли с огромным запасом плавучести кроме отличной «всхожести на волну» приобретали также и резкую килевую качку.

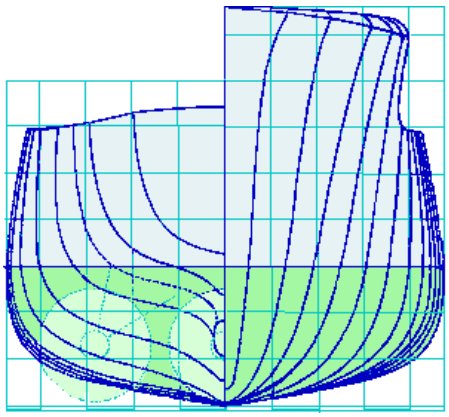


Рис.35. Эсминец «Новик». *Проекция корпус теоретического чертежа.*

В современных проектах кораблей всё в большей степени отражались, ранее активно отклоняемые деструктивные идеи вице-адмирала С. О. Макарова об обеспечении боевой непотопляемости за счет увеличения высоты борта, что формально приводит к увеличению запаса плавучести, и неоправданное усиление интенсивности силового воздействия штормовых волн на корпус корабля. Фактически, это приводило не только к ухудшению штормовой мореходности и безопасности штормового плавания, но также лишало артиллерийский корабль его главного качества – устойчивости корпуса как стабилизированной платформы даже в условиях покатой морской зыби или умеренного волнения.

За точку отсчета современных подходов в российском кораблестроении условно можно принять появление и триумф эсминца типа

"Новик". Это тот весьма показательный случай, когда стремление к максимальной вооруженности корабля возобладало над свойственной мореплавателям заботой о хорошей мореходности.

1 августа 1910 года, на основе конкурсного проекта, под руководством старшего делопроизводителя кораблестроительного отдела Морской технической комиссии, подполковника, корабельного инженера К.А. Теннисона был заложен эскадренный миноносец «Новик», в проекте которого было очень хорошо сбалансировано соотношение мощностей энергетической установки и многочисленных систем вооружений. Форма корпуса корабля вполне соответствовала представлениям о наилучшей мореходности тех лет: надводный борт имел внутренний завал, оконечности корпуса заострены, все шпангоуты построены на плавных лекальных кривых, а вот отношение ширины к осадке корпуса стало несколько большим. Последнее привело к завышенной остойчивости миноносца и уменьшению периода собственных поперечных колебаний корпуса до 6,5–7 сек.

Командир «Новика» – капитан 1-го ранга Д.Н. Вердеревский по результатам испытаний летом 1912 года указывал, что «чрезмерная остойчивость прежде всего отрицательно сказывается на состоянии экипажа и возможности эффективно использовать артиллерийское и торпедное вооружение». Предвидя это, Путиловский завод еще на этапе разработки детального проекта корабля просил Морское министерство разрешить ему несколько увеличить слишком малую осадку «Новика», отрицательно влиявшую на его мореходные качества. Но эта просьба не была удовлетворена, и в результате сразу после ввода новых миноносцев типа «Новик» в строй, они становились экспериментальными в применении различных успокоителей качки.

Несколько завышенный надводный борт и очень высокий полубак этого корабля, внесенные в проект для размещения многочисленных корабельных механизмов и палубных вооружений, также были устроены в ущерб штормовой мореходности, что, как показала морская практика, лишила эсминец «Новик» своих преимуществ в избытке его артиллерийских вооружений, эффективность которых в условиях морской зыби и волнения оказалась не на самом высоком уровне. К

сожалению, негативные элементы формы корпуса «Новика» в современном кораблестроении даже усилены стремлением к обеспечению еще и незаливаемости верхних палуб, что оказалось возможным только за счет недопустимого усиления интенсивности килевой качки, которая стала опасной даже на относительно слабом волнении.

Но все же первые послецусимские проекты линкоров типа «Севастополь» (рис. 36), крейсеров типа «Светлана» (*«Красный Кавказ»*) и эсминцев типа «Новик» еще не утрачивали мореходных свойств старых доцусимских кораблей в целом.

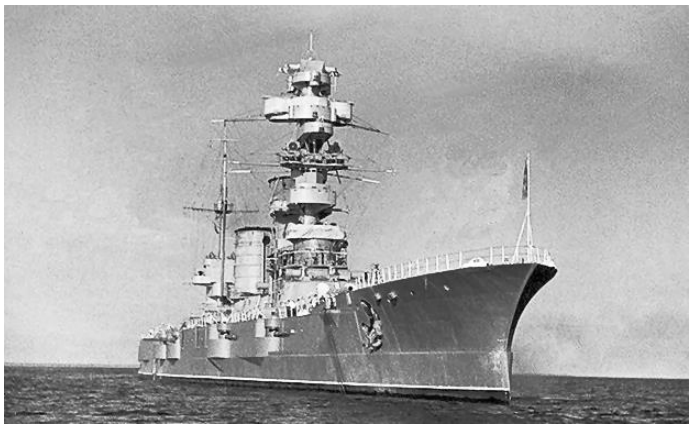


Рис.36. Линкор «Парижская коммуна» *(«Севастополь») с носовой наделкой полубачного типа, которая не столько обеспечивала всхожесть на волну, сколько черпала потоки воды на верхнюю палубу, создавая чудовищные продольно-скручивающие нагрузки на корпус*

Мореплавателям известно, что за непритязательным термином «хорошая морская практика» стоят тысячи поглощенных морской стихией или же благополучно выбравшихся из смертельных океанских переделок судов и человеческих жизней. И, как это ни странно на первый взгляд, но расхождение кораблестроения XX века с хорошей морской практикой было предопределено не столько эйфорией перед кажущимися неограниченными возможностями начавшейся научно-технической революции, сколько по большей части – самой диалектикой противоречий, порожденных бурным развитием этой революции. Если в прежние века корабли создавались практическими мореплавателями «для себя», то объективно возрастающая специализация науки, интенсификация инженерно-технологических работ потребовали формирования самостоятельной кораблестроительной науки и производства. При этом, конечно же, утверждения о принципиальных расхождениях кораблестроительной науки с морской практикой и нави-

гационными науками вряд ли будут уместны, но в то же время отсутствие постоянной практики судовождения у зародившейся к началу XX века плеяды береговых специалистов-кораблестроителей не могло не уводить из их поля зрения отдельные (в т.ч. существенные) особенности реальных воздействий суровой и изменчивой морской стихии на корабль. Как следствие, приоритеты в целом ряде случаев стали перемещаться в сторону не вполне оправданного функционального насыщения кораблей, поддержания соответствующей мореходности за счет усиления их прочностных характеристик, мощности силовых установок и увеличения остойчивости.

Наклоненный вперед форштевень и развал скуловых шпангоутов в советское время был устроен линкорам типа «Севастополь» при их модернизации в конце 20-х годов XX века. Считалось, что это улучшит всхожесть на волну и снизит заливаемость носовой палубы (рис. 36). Но морская практика показала обратное. В ноябре 1929 года линкор «Парижская коммуна» (бывший «Севастополь») под командованием Л.М. Галлера ушел в дальнее плавание на Средиземное море, но на пути, в Бискайском заливе, попал в жестокий шторм. Носовая наделка ничуть не улучшила всхожесть на волну, а наоборот, черпала воду, из-за чего корабль зарывался носом еще сильнее. Крен достигал 29 градусов, нарушилась герметичность палубных люков, один за другим начали выходить из строя различные механизмы. Положение стало критическим. К счастью, несуразная носовая конструкция под ударами волн вскоре развалилась, несколько облегчив движение линкора … Носовая часть современных кораблей, и в том числе большого водоизмещения, имеет еще более высокий и широкий полубак.

Однако победившая в цусимской компании Япония, воевавшая на английских кораблях, включила в свою новую кораблестроительную программу не новомодные английские дредноуты, а проекты кораблей, более похожие на русские «Бородино» и «Цесаревича».

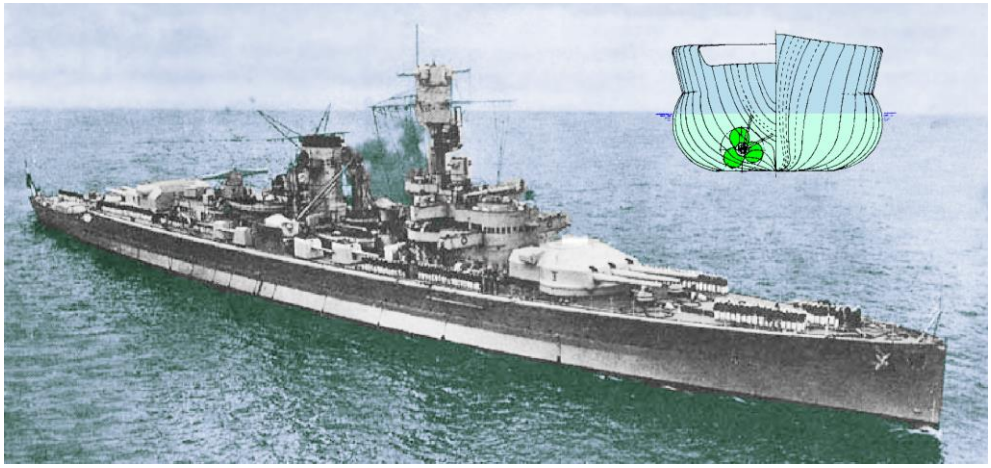


***Рис.37. Немецкий линкор «Адмирал граф Шпее»**, как и другие крупные немецкие корабли того времени, обладал заметным завалом бортов на уровне действующей ватерлинии, очень заостренными штевнями и малыми моментами инерции площади ватерлиний в оконечностях во всем диапазоне изменения посадки в условиях океанской качки. Безусловно, что именно эти качества формы корпуса корабля способствовали хорошей ходкости и высокой эффективности артиллерии в условиях океанской зыби и сильного волнения. Корпус корабля рассчитан на эксплуатацию в условиях постоянной забрызгиваемости верхних палуб, обусловленной малой килевой качкой, отчего возможная заливаемость не грозила заныриванием корабля под встречную волну.*

Примечательно также, что обводы корпуса, заострение оконечностей, завал бортов на уровне действующей ватерлинии и внешняя архитектура немецких карманных линкоров (рис. 37) в целом тоже приводили их к мореходным качествам, аналогичным последним русским эскадренным броненосцам. Причем, по многим документальным съемкам немецких кораблей, отмечается постоянное присутствие воды на верхней палубе, что свидетельствует о важной для артиллерийских кораблей стабилизации килевой качки в ущерб «всхожести на волну» и «незаливаемости».

Новые эсминцы 1930-х годов типа «Гневный» (*проект 7*) уже не имели завала бортов в средней части корпуса, форштевень был заметно наклонен вперед, а узкая крейсерская корма заменена на широкую транцевую. Соответственно, изгибно-скучивающие нагрузки на корпус эсминца при его плавании в условиях штормового волнения многократно возрастали. 22 ноября 1942 года при плавании в штормовых условиях Баренцева моря эсминец «**Сокрушительный**», штормуя ма-

лым ходом на курсе носом на волну, неожиданно потерял 26 метров своей широкой транцевой кормы, отломившейся до водонепроницаемой переборки машинного отделения. Кормовая часть быстро затонула вместе с находившимися в кубриках матросами, при этом качка оставшейся части корпуса стабилизировалась, и аварийный корабль еще не менее двух суток штормовал без хода, что позволило спасти большую часть его экипажа.

Трагическая морская практика кораблей этого типа, к сожалению, с точностью до наоборот отразилась в проектах современных кораблей с еще более широкими транцевыми кормами и полубаками, да еще и с развалом бортов в средней части корпуса. Это свидетельствует о современной концепции кораблестроения, ориентированной на поддержание абсолютной «всхожести на волну», что вполне соответствует и современному требованию по запасу плавучести, многократно превышающему водоизмещение корабля.

Отрыв от морской практики отмечен и другими технологическими «успехами» современной «самостоятельной» кораблестроительной науки. В начале XX века транспортные суда оборудовались парусиновыми люковыми закрытиями, унаследованными еще с парусного флота. Опасность для штормования представлялась в результате срыва такого закрытия «гуляющей» по палубе штормовой волной, что усугублялось как постоянно увеличивающимися размерами люковых закрытий на новых транспортных судах, так и все большей открытостью верхних палуб для ударов волн. Для обеспечения прочности и надежности люковых закрытий были созданы складывающиеся металлические люки типа "Мак-Грегори", повсеместно внедренные, правда, только в 50-е годы.



Рис.38. Лидер «Ташкент». *Вторая мировая война испытывала на прочность не только самоотверженность корабельных минно-артиллерийских расчетов, во многих случаях искусство штормового кораблевождения оказывалось не менее важным средством поддержания боеготовности корабля в открытом море.*

Независимо эту же задачу решили и корабельные инженеры, которые для защиты люковых закрытий пытались обеспечить незаливаемость верхних палуб, придавая корпусу судна свойство всхожести на волну. Форштевень судна (или корабля) стал наклонным вперед, а над ним стала простираться широкая палуба бака с крылообразным развалом носовых шпангоутов, что вместо ожидаемой «всхожести на волну» привело к резкой килевой качке и явлению «зарывания» или даже «подныривания» под встречную волну. Широкая и объемная, нависающая над водой транцевая корма, устроенная, видимо, для стабилизации потока в районе винто-рулевого комплекса, теперь стала подхватываться штормовой волной, усугубляя рыскание, бортовую качку и даже, угрожая опасными захватами корпуса попутной волной.

Судовладельцы, зная о проблемах штормовой мореходности, организовали службу штормовых предупреждений, которая вырабатывала рекомендации по обязательному уклонению от циклонов, по сути – отреагировали запретами плавания в штормовую погоду.

К сожалению, достижение незаливаемости палуб за счет хорошей всхожести на волну привело к необходимости усиления продольной прочности корпуса (*эскадренные миноносцы без высокого полубака намного легче держали ход на волнении*). Наблюдения за поведением корпуса судна во время штормовых ходовых вахт также наглядно подтверждали, что задача о безусловной незаливаемости верхней палубы приводит к совершено неприемлемым, а часто и к прямо противоположным результатам. Так, рыболовный траулер, постоянно падая

с гребня одной волны, принимал на свою широкую носовую палубу следующую волну в ее наиболее разрушительной фазе. В результате интенсивной килевой качки вертикальное ускорение в носовом части корпуса нередко превышало ускорение свободного падения g, что наглядно проявлялось разбросанными грузами в носовом трюме и в кормовой провизионке этого траулера.

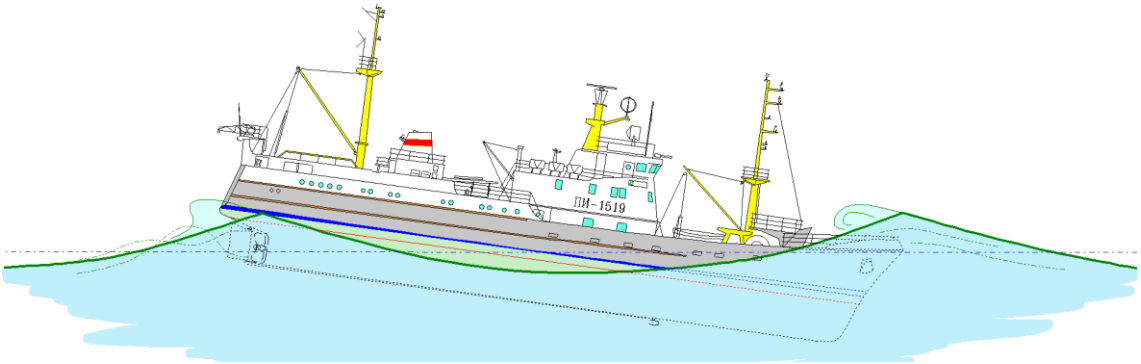


***Рис.39. Траулер, скатывающийся под волну**. Это единственно допустимый режим штормования для этого судна (СРТМК), так как движение вразрез волне невозможно из-за ударов волн по развалистой скуле. Траулер поддерживает ход, необходимый для сохранения управляемости, это усиливает разрушительную силу падающей на бак волны. В следующий момент между баком и надстройкой образуется озеро метровой глубины, судно теряет остойчивость и, кренясь, сбрасывает это "озеро" через фальшборт. Широкая транцевая корма - это опасность захвата корпуса попутной волной и опрокидывания при крутом выходе с курса по волне (но "морские волки" должны обгонять волну, давая полный или даже форсированный ход).*

Для уменьшения качки, предотвращения днищевого слеминга и чрезмерных изгибных нагрузок корпуса на волнении обычно используется режим штормования вразрез волне, при котором поддерживается минимальный ход с курсовым углом приблизительно 30 градусов от встречного к волнению. Такое плавание сопровождается разрушительными воздействиями на двигатели и рулевые устройства, так как для удержания минимального хода главные двигатели работают на малых оборотах и с огромными внешними перегрузками на движителях, а для сохранения управляемости требуются постоянные перекладки руля чуть ли не с борта на борт. Вследствие усиленной килевой качки и малого хода создаются условия для оголения винторулевого комплекса, что приводит к его ударным перегрузкам. Штор-

мование вразрез волне является комбинированным методом, в котором небольшие отклонения от курса носом на волну позволяют корпусу плавно отслеживать волновую поверхность при довольно сильном рыскании на штормовом курсе, при котором рулевой сохраняет режим активного хода, не отдает судно полностью во власть волны.

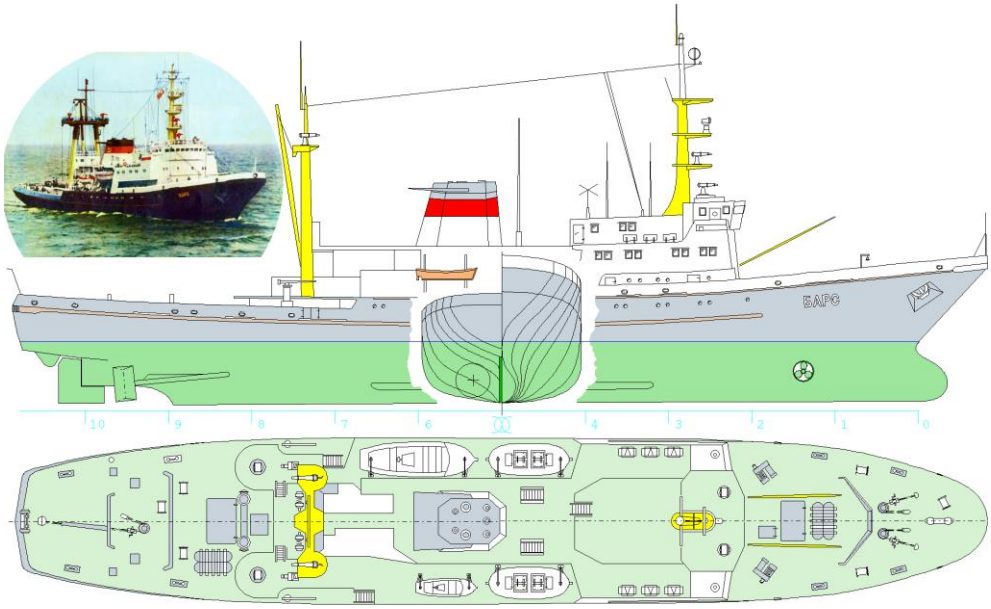


Рис.40. Океанский спасатель. *На основе исторического анализа эти корабли можно сопоставить с поморскими кочами и ладьями викингов, если, конечно, исключить соотношение размеров корпуса и его относительную прочность. Такие обводы оправданы только для малых судов, способных удерживаться на поверхности волны, несмотря на огромные ускорения в процессе качки (теоретически - это g, если на вершине волны имеется обрушающийся гребень), и перед которыми не ставится задача сохранения хода, работоспособности оборудования, комфортной обитаемости и т.п. Остается надежда, что такая форма корпуса всего лишь вершина абсурдов борьбы с заливаемостью верхних палуб*

Но и этот метод плавания был отменен из-за установки носового бульба, так как в результате повышенной массовой инерционности и жесткой гидродинамической устойчивости этого бульба на курсе вразрез волны может быть получен сильнейший удар волны по скуле, имеющей сильный развал носовых шпангоутов. Удары по скуле правильнее было бы определить как новый вид слеминга, вызванный усилением динамического взаимодействия корпуса и волнения.

В основном режиме работы рыболовного траулера, при выборке трала на курсе по волне, даже в случае умеренного волнения регулярно ощущаются удары слеминга также и под широкой транцевой кормой, которые к тому же сопровождаются продольной вибрацией корпуса. Главной особенностью рыболовных судов является необходимость работы экипажа на верхней палубе при умеренных штормах, при которых либо еще продолжается рыбалка, либо сети поднимаются на борт с последующим креплением «по штормовому». В данном случае достижение незаливаемости бака, которое имеет следствием усиление всех видов качки, приходит в явное противоречие с обеспечением безопасности работы на кормовой траловой палубе.

Если же траулер, к примеру, следуя штормовым курсом носом на волну немного превысит скорость, то в условиях зарываемости под встречную волну будут получены сильнейшие удары обрушающегося потока по широкой палубе бака, а при уменьшении хода появляется риск потери управляемости и самопроизвольного выхода на курс лагом к волне, после чего может не хватить мощности машин для возврата на курс безопасного штормования.

Но все же стабилизация корпуса особенно важна для кораблей с гидро- и радиолокационным оборудованием, которое слепнет в условиях интенсивной качки. Как известно, при плавании на умеренном волнении новейший английский эсминец «Шэффилд» погиб, оказавшись беззащитным даже перед морально устаревшим ракетным оружием аргентинского самолета.

Исследование мореходных качеств современного флота является особой задачей, сулящей множество неожиданных открытий, особенно связанных с широким разнообразием обводов корпусов современных кораблей и судов. К сожалению, до настоящего времени в России не налажено постоянного взаимодействия кораблестроительной науки с капитанским опытом реального мореплавания, не опубликованы и не переданы широкой научной общественности материалы о мореходности, имеющиеся в судовых журналах 2-й Тихоокеанской эскадры адмирала З.П. Рожественского, не учитывается опыт флотских ис-

пытаний на мерных милях, которые в начале XX века проводились даже в условиях штормового волнения.

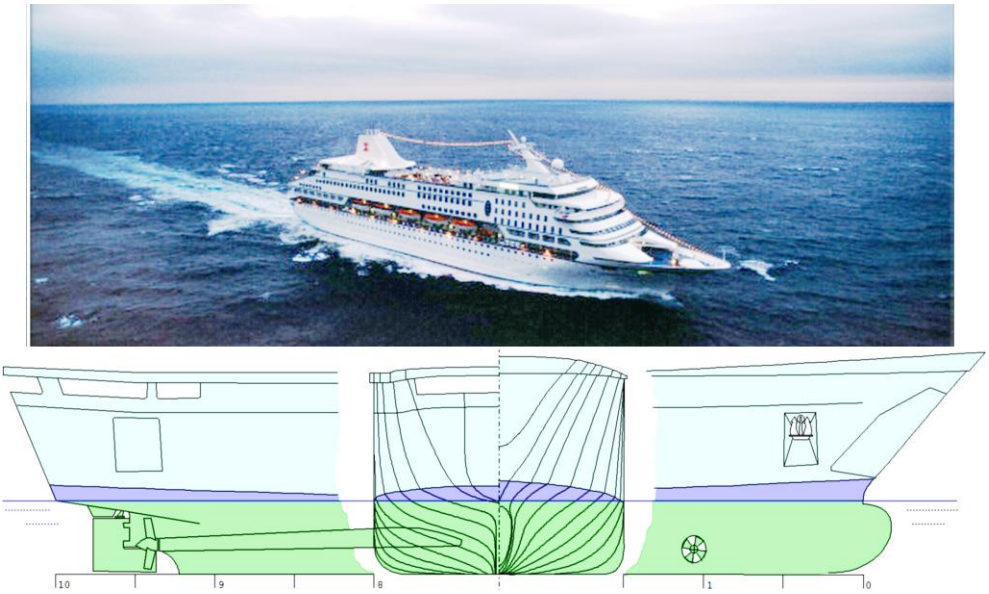


Рис.41. Пассажирский лайнер. *Огромный надводный объем в носовой части корпуса предполагает плавание на волнении со свободным рысканием на курсе, но этого не допускает бульб. Широкая кормовая палуба существенно ограничивает возможности выбора штормового курса. В целом же штормовая безопасность этого судна всецело зависит от надежности двигателей и опытности ходовой вахты или от возможности быстро укрыться от непогоды в ближайшем порту – убежище*

Настоящие исследования штормовой мореходности полностью опираются на выводы из собственной морской практики автора, да на поддержку и взаимопонимание многих капитанов и судоводителей, с которыми приходилось обсуждать эту тему на Черном море, на Балтике, в Атлантическом и Тихом океанах. Многие исторические примеры приукрашены сленгом береговых встреч с однокашниками по мореходке, отчего и сложилось эмоционально-палубное и полукритическое восприятие традиционного ныне искусства проектирования формы современных кораблей и судов.

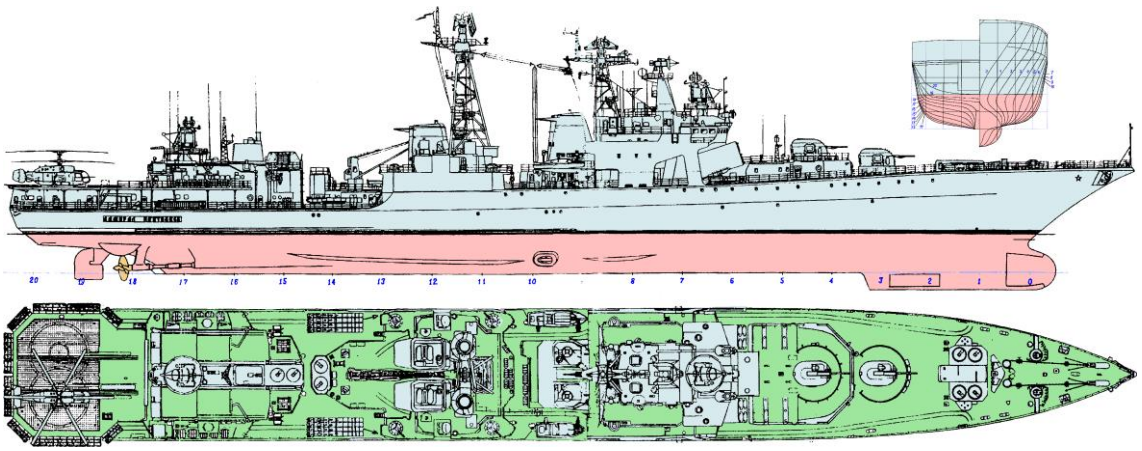


Рис.42. Форма корпуса современного корабля I-го ранга «Адмирал Пантелеев». *Корабль имеет очень большой развал бортов в районе действующей ватерлинии, что обуславливает интенсивную бортовую качку на штормовом волнении. Очень высокий надводный борт, огромный развал носовых шпангоутов и большая дополнительная плавучесть в кормовой части корпуса приводят к недопустимой интенсивности всех видов качки. При этом глубоко посаженый бульб не позволяет корпусу уворачиваться (рыскать) от ударов встречных волн. Если же командир примет решение об уменьшении бортовой качки за счет снижения начальной остойчивости, то также будут существенно уменьшены и запас остойчивости, и угол ее заката, что создаст опасность опрокидывания корабля*

И все же корабль является сложной, но единой инженерной системой, и если при его проектировании усиливается одно из эксплуатационных требований, то из этого не должно следовать абсурдного следствия, которое, если не губит на корню мореходность корабля в целом, то нередко снимает актуальность или делает абсурдным требование – причину (подобно случаю борьбы с незаливаемостью).

Предварительные предложения по корабельной архитектуре

Проектирование корабля, как инженерного сооружения, должно обеспечивать сочетание свойств непротивления стихии с возможностями активного управления судном в штормовом море в соответствии с его назначением.

Современные корабли обладают огромными запасами мощности главных двигателей, а также очень прочными корпусами, что позволяет им уверенно штормовать в открытом море при активном исполь-

зовании (и чрезмерной перегрузке) винто-рулевых комплексов. Учитывая исторический опыт мореплавания и непротиворечивого проектирования кораблей различного назначения, можно существенно повысить эффективность, экономичность и безопасность эксплуатации флота.

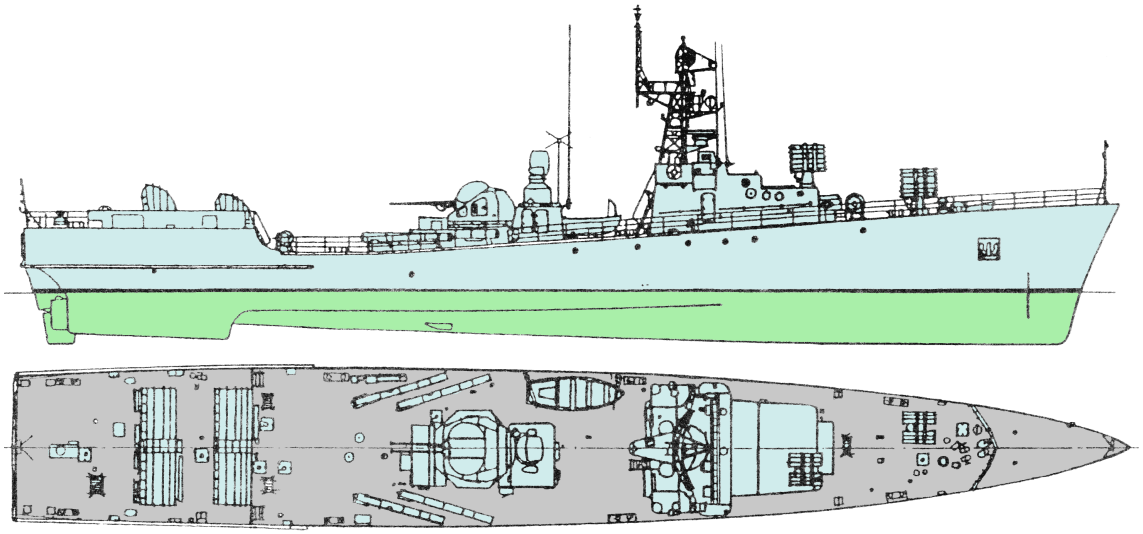


Рис.43. Малый противолодочный корабль пр.204 *(1964 г.), как пример удачного проектирования высокоскоростного специализированного корабля прибрежного плавания. Корпус корабля является ярким примером обводов типа «двойного клина». Этому кораблю, оснащенному суперкавитирующими винтами с принудительным нагнетанием воздуха в область их действия, нестрашны оголения винто-рулевого комплекса, когда он начинает «перепрыгивать» с одной штормовой волны на другую. Подобно средиземноморским галерам, в основную задачу этого корабля входит охрана водного района вблизи торговых портов или военно-морских баз, где он может укрыться и сам, спасаясь от штормов. В свежую погоду такие малые корабли охраны водного района отстаиваются у причалов военно-морской базы, а по тревоге готовы выскочить в море с предельно максимальной скоростью. Неадекватное поведение такого корабля на волнении требует особого опыта и автоматизма от рулевого, поэтому для управления ходом желательно использование компьютерные экспертно-измерительные и управляющие комплексы, которые либо автоматически поддерживали бы ход, либо наилучшим образом стабилизировали корпус корабля для повышения эффективности использования вооружений. Малому кораблю с относительно высокой прочностью корпуса вполне позволительно работать на форсированных режимах с предельными нагрузками на корпус и корабельное оборудование.*

Полагаясь на безграничные технические возможности и энергетические мощности современных кораблей, оптимизация формы кор-

пуса и общекорабельной архитектуры может быть проведена с целью особой специализации корабля по назначению и условиям повседневной эксплуатации. Оптимизация по жестко заданным формальным критериям нередко приводит к проявлению критических режимов, когда человек не сможет адекватно оценивать обстановку на море и предпринимать действия по управлению кораблем в сложных условиях плавания, во внештатных или аварийных ситуациях.

К примеру, достижение наилучшей штормовой мореходности может позволить поддерживать высокую скорость хода при стабилизации корпуса активными успокоителями качки, малейшая ошибка в управлении которыми будет представлять немалую опасность для удержания корабля на поверхности воды. Поэтому специализированное проектирование должно требовать более углубленного изучения особенностей эксплуатации флота в штормовых режимах плавания, чтобы после математизации основных законов и опытовых экспериментов по штормовому управлению кораблем можно было воспользоваться как аналитическими возможностями бортовых вычислительных комплексов, так и практическим опытом по обеспечению безопасности корабля при сбоях автоматических систем управления, формализованных в рамках тех же компьютерных экспертных систем.

В заключение можно сформулировать основные требования к мореходным качествам судна и на их основе построить гипотетическую модель формы корпуса и общекорабельной архитектуры:

- *Кораблям ВМФ, исследовательским и рыболовным судам необходимы:*
  - а) стабилизация корпуса (как платформы для оборудования);
  - б) поддержание активного движения в любых погодных условиях (имеется в виду заданный курс и скорость);
- *Суда спасательной и патрульной службы должны иметь возможность поддержания хода на произвольном курсе относительно штормового волнения, а также активно маневрировать в любых погодных условиях;*
- *К транспортному судну с маломощными двигателями не всегда возможно предъявление требований о всепогодной эксплуатации,*

однако поддержание хода в условиях интенсивного волнения является чисто экономическим требованием. Сохранение активного хода на волнении также необходимо для уклонения или обхода циклонов, а при встрече с ураганными штормами судно должно иметь возможность пассивного штормования в режиме носом на волну, обеспечивающем минимальные нагрузки на корпус и груз;

- *Конечно, это необходимо для всех морских судов, а для пассажирских и рыбообрабатывающих судов важно также и по этическим нормам (здесь нет проблем ни с обеспечением высокой скорости транспортировки грузов, ни с поддержанием боеготовности) – это* ***требование безопасности штормового плавания без хода****, которое должно быть обеспечено проектированием специальной формы корпуса и надстроек.*

Реально – это три взаимоувязанные проблемы: **1 - ходкость; 2 - стабилизация корпуса; 3 - безопасность плавания,** которые должны решаться применительно к реальному плаванию, в том числе в условиях штормового волнения. Следуя вышеописанным проектным требованиям, полученным из исторического анализа свойств корабельной архитектуры, в предполагаемый проект нового корабля должны быть включены следующие 6 взаимозависимых правил:

1. *Смещение центра величины в нос до приведения на одну вертикаль или даже опережения динамического центра бокового сопротивления. Это обеспечит стабилизацию качки при движении на волнении, а без хода создаст предпосылки для безопасного штормования;*
2. *Существенное уменьшение площади, а также поперечного и продольного моментов инерции действующей ватерлинии и заострение ее в оконечностях для уменьшения силового воздействия умеренного волнения и сохранения ходкости в условиях океанского плавания;*
3. *Исключение развала бортов, широкой и непрерывной верхней палубы (а также наклона вперед надводной части форштевня). Во время штормового плавания это снимет проблему чрезмерной*

качки и ударов волн как по корпусу, так и по палубе, а также создаст условия для активного управления ходом судна;

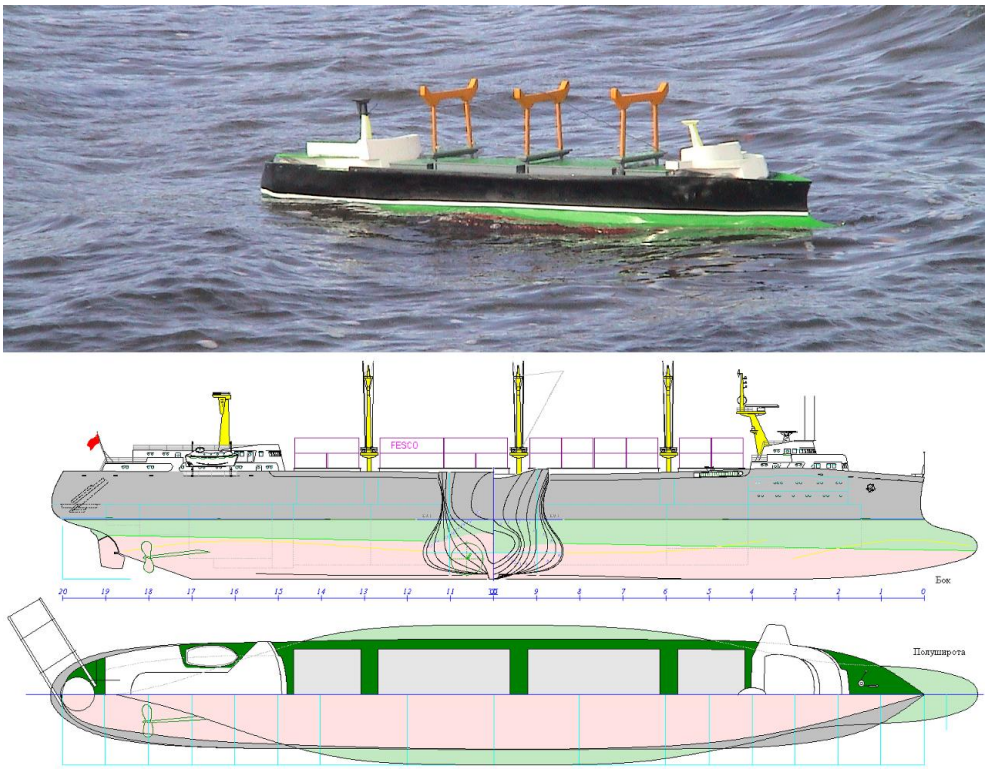


Рис.44. Эскиз универсального судна, штормовая мореходность которого подобна старинной галере с бульбовым носом. *Такой корпус позволяет удерживать судно на штормовом курсе носом на волну даже при относительно маломощных двигателях, которые фактически исполняют роль кормового весла-плавника. В проекте показывается, что реализация формы корпуса, удовлетворяющей всем вышеперечисленным требованиям к мореходности, и использование этого корпуса возможно даже в случае самого сложного универсального судна.*

4. *Существенное уменьшение надводных объемов корпуса в оконечностях. Если надводный центр парусности привести к средней части корпуса, то это улучшит штормовую управляемость, если же обеспечить завал борта на уровне действующей ватерлинии, то это стабилизирует ход на волнении без усиления килевой качки и рыскания, так как движущийся с высокой скоростью корабль перейдет в режим прорезания волн;*
5. *Последнее не противоречит переносу основных надводных объемов в кормовую часть корпуса (конечно же, без образования широкого транца и плоского кормового подзора) по правилу: нос загружается в подводной части, а кормовой объем нависает над*

водой, в том числе и за кормовым перпендикуляром. Таким образом, будут выполнены требования безопасного штормования в режиме носом на волну. Такое решение учитывает свойства реального штормового волнения, исключая, может быть, условия непредсказуемости волнообразования в центре циклона. Завышенные кормовой надводный объем и высота юта не мешают поддержанию эффективности хода и управляемости, так как ускоренный движителем поток "удерживает" кормовой подзор на осредненном уровне поверхности взволнованного моря.

6. *Существенное уменьшение парусности и высоты надстроек, с переносом соответствующих помещений внутрь гидродинамически обоснованного корпуса – это уже хорошая морская примета: "**Красота корабля определяется отсутствием на его борту ненужных вещей**". Попутно снимаются ограничения на выбор штормового курса, обусловленные заливаемостью, а также решается проблема ветрового крена, и, как следствие, за счет уменьшения начальной метацентрической высоты корпус может стать пассивным по отношению к кренящему воздействию волн, и, уж конечно, - это основное и единственное решение задачи в борьбе с обледенением.*

Указанные правила не противоречат другим мореходным качествам:

- *Ходкость на спокойной воде, обусловленная бульбовыми обводами и округлыми шпангоутами, вмещающими наибольший объем в минимальную поверхность судовой обшивки;*
- *Исключение отрыва пограничного слоя в районе руля и движителей достигается плавностью продольных линий теоретического чертежа, образующих обводы корпуса;*
- *Проходимость во льдах может быть достигнута в режиме подламывания льда снизу, что также решает проблему ледовой защиты движителей.*

В описанных правилах упомянут завал борта на уровне действующей ватерлинии (пп.4). Это новый элемент формы корпуса, выведенный из принципа непротивления морской стихии. Скорее всего, корабелы прошлого века широко использовали бы такой завал борта у

корпусов военных кораблей, если бы форма мидельшпангоута не определялась громоздкостью паровых машин, используемых в то время в качестве главных двигателей.

Новые показательные кораблестроительные решения

Искусство проектирования современного корабля отчасти выходит из тени закрытых конструкторских кабинетов[6], чему способствует вездесущность новых информационных технологий, открывающих свободный доступ к новейшим концепциям проектирования, изучению мореходности корабля и морских исследований в целом для широкого круга студенческой и курсантской молодежи и морских профессионалов, получающих возможность разработки обоснованных технических предложений и требований к судостроению, к формированию новых наставлений мореплавателям и участию в практическом обустройстве региональной морской инфраструктуры.

Столь революционные преобразования в морских науках представлены американскими корабелами, озвучившими новые концептуальные положения «целевого проектирования» на конференции STAB-2009[7], проходившей в этом году в Репино Ленинградской области. В отличие от российского судостроения в США морские науки географически разнесены по четырем прибрежным регионам и сконцентрированы в крупнейших кораблестроительных корпорациях и морских базах флота, где моряки и корабелы всегда представлялись единым морским и научным сообществом.

Вполне естественным в концепции «целевого проектирования» представляется обоснование необходимости строительства нового

---

[6] *Храмушин В. Н.* Геометрическая интерпретация волнового сопротивления с целью проектирования формы корпуса судна (с.56–58); Историко-технический анализ мореходности и выработка эвристических правил проектирования формы корпуса судна (с.59–50) : X Дальневосточная научно-техническая конференция. Опыт проектирования и модернизации судов для дальневосточного бассейна. – Владивосток: ВНТО им. ак. А. Н. Крылова, 1989.

[7] Proceedings. 10th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles. STAB-2009, June 22–26 , 2009. S-Petersburg, Russia. 754 p. ISBN: 587399-145-6.

флота по прямым техническим заданиям опытных мореплавателей, которые впоследствии берут на себя ответственность как за эксплуатационную эффективность нового флота, так и за безопасность плавания в сложных и штормовых условиях.

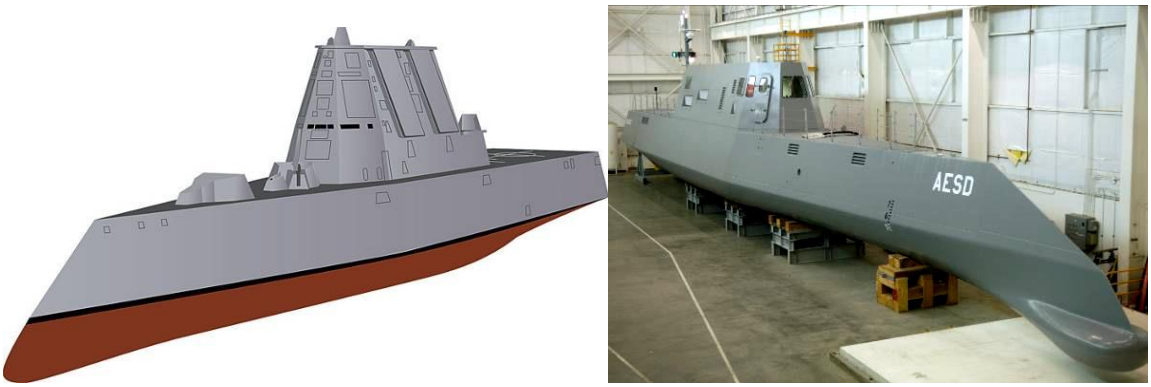


Рис. 45. Проектное изображение корабля УРО (DDG-1000) Zumwalt (слева) и его модель в масштабе 1/4 (справа)[8]*. Техническим проектом предусматривается поддержание 30-узл. хода и боеготовности ракетных систем в любых погодных условиях*

Другой пример – сверхдорогостоящий проект корабля УРО XXI века В качестве одного из показательных примеров[9] стал проект одноразового судна, которое может иметь предельно низкую стоимость и совершить свой единственный морской переход под надежным прогнозом благоприятных погодных условий.

– эсминца DDG-1000 «Zumwalt», в котором учтены пожелания военных моряков, ни в коей мере не согласованные с действующими сертификационными требованиями. В последнем случае морские инженеры обретают законное право комплексного изучения и исследования всех аспектов мореходности, жизнеобеспечения и безопасности корабля, в том числе в боевых условиях, результатом которых становятся обновляемые сертификационные требования для конкретного направления целевого непротиворечивого проектирования новых кораблей, а также отработки всего комплекса наставлений мореплавате-

[8] "Stabilized Tumblehome Hull Form". *Gabor Karafiath.* Secretary of NAVY. United States Patent № 6,601,529, B1. Aug. 5, 2003.

[9] "A Naval Perspective on Ship Stability". *Arthur M. Reed*. Carderock Division, Naval Surface Warfare Center // STAB-2009.

лям по эффективному кораблевождению, использованию вооружений и борьбе за живучесть корабля.

Безусловно, что столь смелые проектные решения могут быть приняты только с опорой на новейшие достижения фундаментальных наук, на возможности глубокого экспертного анализа современного опыта практического мореплавания, техническую основу которым снова образуют экспертные знания мореплавателей, информационные технологии и новейшие технические средства для экспериментальных исследований.



Рис. 46. Вспомогательное судно Bourbon Orca*. Норвегия, 2006 г.*



Рис. 47. Быстроходное прогулочное судно Maryslim*, Англия (КиЯ, № 5, 2008)*



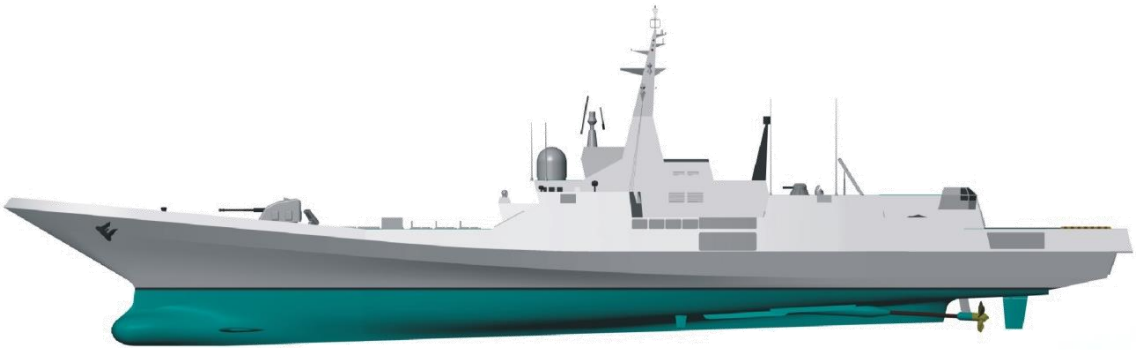
Рис. 48. Крупное прогулочное судно *- Моторная яхта A, Германия, Blohm&Voss, 2009 (www.charterworld.com)*

К настоящему времени построены новые суда повышенной штормовой мореходности в Норвегии (рис. 46 и 49-справа), в Англии (рис. 47) и Германии (рис. 48и 49-слева), в которых использованы элементы формы корпуса (в носовой оконечности), аналогичные обоснованным и опубликованным в настоящей работе.



Рис. 49. Проекты корабля Германии (слева) и траулера Норвегии (справа) *не следуют опасным веяниям «технической эстетики», возвращаясь к историческим достижениям морских инженеров XIX века, не допускавших в архитектуре красивого корабля ничего лишнего – оставляя задачей целевого проектирования лишь высокую эффективность корабля.*

Нельзя не отметить российских «достижений» в области проектирования новых кораблей и судов. Если 20 лет назад высказывалась мысль о том, что советские корабелы старались «осчастливить» капитанов видом с мостика судна, напоминающим летнюю прогулку по озеру на катере «Прогресс», то ныне технический прогресс (*где эстетика вместо морской грамотности*) сводится к форме гражданских судов в виде «детского тазика», а боевых кораблей в форме двойного «клина-топора» (рис. 49).



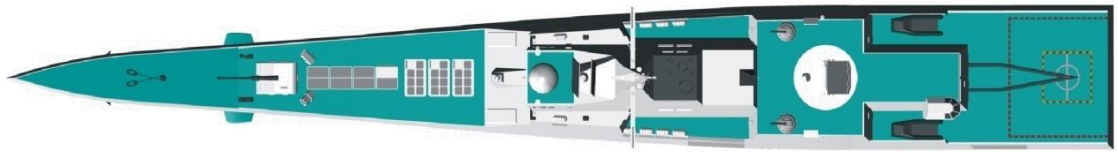


Рис. 50. Перспективный проект современного корабля *тихого моря*

Другие российские проекты боевых кораблей опираются на прототипы быстроходных полуглиссирующих средиземноморских «катеров и яхт», вполне приемлемых для использования лишь в штилевую погоду в озерно-речных условиях. Столь странные корабли пополняют морчасти погранвойск, что во многом успокаивает браконьеров и контрабандистов отсутствием реального контроля в акваториях Сахалина и Курильских островов в свежую погоду.

Можно заключить, что рыбакам – проще, в отличие от военных они могут отказаться от услуг российского судостроения и заказывать новые суда за рубежом, оговаривая условия штормовой мореходностью, избыточную мощность машин с должным оснащением рыболовными снастями, палубной механизацией и рефрижераторным оборудованием. Возникающая при этом проблема нежелания Морского Регистра классифицировать рыболовные суда зарубежной постройки, просто решается подъемом чужих государственных флагов и, что еще хуже, всячески отстраняться от заходов в родные порты.

Решение вышеозначенной проблемы возможно только при уважительном отношении к профессионализму рыбаков и всех мореплавателей, которые обязаны самостоятельно заниматься совершенствованием флота, обустраивать береговую инфраструктуру и вести подготовку региональных морских кадров высшей квалификации, изначально адаптированных к работе в сложных, ледовых и штормовых условиях дальневосточных морей России.

II. Береговая инфраструктура и условия штормового мореходства

История мореходства не менее удивительна, чем изучение древнего кораблестроительного искусства. Освоение океана связано не только с развитием инженерно-технической мысли, но также и с необходимостью адаптации людей и техники к природным факторам, к множеству опасных морских явлений, всегда сопутствующих неугомонной жизни мореплавателей. Если развитие кораблестроения может характеризовать способности общества по концентрации научной мысли и координации технологических возможностей внутри государства, то активное мореходство во многом зависит от стабильности международных отношений, от взаимопонимания народов и межгосударственного сотрудничества по обустройству морского побережья.

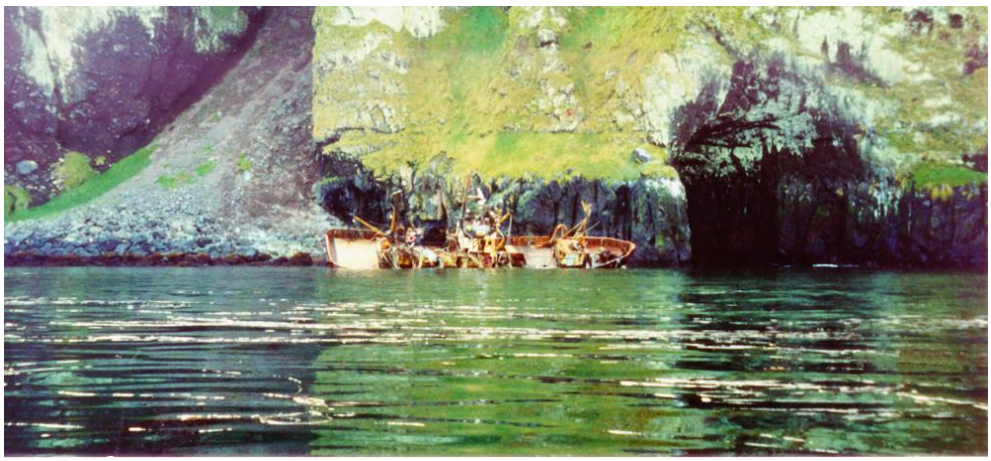


Рис. 1. Рыболовный сейнер в нежеланных «объятьях» берега. *Морякам вольготнее на открытых просторах, вдали от границы вечного противостояния земной и водной стихий.*

Утром современной человеческой цивилизации называют наступление последнего, самого молодого отрезка геологической истории Земли – голоцена, начавшегося приблизительно 16 тысяч лет назад. Потепление климата Земли и таяние ледников привели к медленной планетарной трансгрессии океана, и 13-14 тысяч лет назад у Средиземноморского побережья Франции уровень моря поднялся до отметки на 70-80 метров ниже современного. Около 8 тысяч лет назад

уровень океана стабилизировался на отметке –25 м, и последовавшее затем новое потепление привело к подъему уровня океана даже выше современного. На этот благодатный период повышенной влажности приходится расцвет многих среднеазиатских и африканских цивилизаций, исчезнувших при небольшом похолодании и резком уменьшении интенсивности круговорота атмосферой влаги, отчего благодатные озерно-речные материковые низменности превратились в песчаные пустыни. Одновременно на Земле поутихли штормовые ветра, в полярные районы вернулись ледники, а в поясе умеренного климата люди стали тесниться к источникам пресной воды, к рекам и непересыхающим озерам. Близкое к современному состояние климата Земли и уровня Океана стабилизировались примерно к 700 году до н.э. Примерно с этого же момента времени человеческая цивилизация уже не теряет исторической преемственности, сохраняется технологическое и культурное наследие поколений.



***Рис. 2. На морском побережье ничто не бывает вечным**. Прибойные волны и свежий ветер способны в короткие сроки скрыть следы человеческой деятельности, унося в небытие даже самые крепкие инженерные сооружения.*

Для истории древнего мореплавания такие климатические неурядицы, постоянные изменения береговых очертаний, штормовые наводнения, частые моретрясения и цунами, обусловленные глобальными геофизическими процессами на земле, означают довольно сложный период, период трагической борьбы человеческой инженерной мысли за возможность жизни на море, за возможность обустрой-

ства прибрежных городов, морских гаваней и безопасных для кораблей портов – убежищ.

Первым мореходным народом древности, сведения о коем до нас дошли, были финикияне. Происхождение этого народа и время его поселения на берегах Сирии с достоверностью неизвестны. Узкая полоса восточного побережья Средиземного моря у подножия Ливанских гор, подступающих здесь очень близко к берегу, не давала финикиянам простора для обживания территории своей горной страны, но, с другой стороны, этот берег на протяжении 200 км имеет несколько небольших мысов, образующих удобные места для устройства морских гаваней. Покрытые корабельным лесом склоны гор, а также несомненно высокий инженерно-технологический уровень развития древних стран Малой Азии благоприятствовали развитию судостроения и морского промысла в этой древней стране - Финикии.

Первые сведения, дошедшие до нас о финикиянах (3000 лет до н.э.), рисуют их уже могущественным мореходным и торговым народом, который к этому времени успел развить морскую инфраструктуру далеко на запад по берегам Средиземного моря, построив на Атлантическом побережье современной Испании город и порт Кадис (*Гадир, 1100 лет до н.э.*), основав мощное морское государство – Карфаген (*предместье города Бизерта в Тунисе*). Финикияне были знакомы на востоке с берегами Красного моря, Персидского залива и берегами Африки в Индийском океане. Легенды американских индейцев упоминают также о трансатлантических походах древних средиземноморских мореплавателей к берегам Южной Америки, возможность которых небезуспешно подтверждалась известными экспедициями Тура Хейердала.

Сложные природные условия обитания людей на морском побережье, нередкие катастрофические морские явления, приводящие к разрушению инфраструктуры и даже гибели приморских государств, не позволили в полной мере сохранить преемственность в развитии древнего мореходства.



Рис. 3. Фалес из Милета
(Гравюра на бронзе. XVIII в)

Но все же, упоминания о средиземноморском мореходстве, как об обыденном явлении, сохранились в древнегреческой философской литературе. Причем истоки своего морского искусства просвещенные греки связывали с именем знатного финикийца, гражданина города Милета – Фалеса (625-547 гг. до н.э.), первого из семи мудрецов, первого и наиболее авторитетного просветителя и фактического основателя будущей школы греческой философии. Ученый, философ и путешественник, Фалес стремился передать грекам свои обширные познания о мореходной астрономии, океанографии и других морских науках, отчего восхищенные греки называли его не иначе как поклонником и проповедником водной стихии. Сохранилось его любопытное высказывание о происхождении вселенной: «... ***вода есть начало и конец всего, ибо из нее путем сгущения и испарения составляется всё и всё ею поддерживается, вследствие чего происходят колебания земли и вихри, и движение светил, и все увлекается и течет сообразно природе первого родоначальника всего сущего***»

С именем Фалеса связываются также и основополагающие естественнонаучные знания: он ввел в пользование древних европейцев современный календарь и двенадцатеричную систему счисления; был автором пособия «Судоводительская астрономия», в котором излагались математические расчеты по морской астрономии и навигации с использованием звезд; умел рассчитывать и предсказывать солнечные и лунные затмения; правильно объяснял природу нагонных наводнений на Ниле. Во времена Фалеса философы приписывали магнитным явлениям сверхъестественные свойства, и не только за возможность использования их в качестве морских компáсов, но также и за чув-

ствительность к геофизическим аномалиям в сейсмо- и вулканоактивном Средиземноморье[10]. Кроме того, Фалес проповедовал множество этических установок и правил социального поведения людей, которые в будущем были отражены и закреплены в канонах и догматах современных мировых религий.

К эпохе Фалеса относятся упоминания Геродота (VI век до н.э.) о плавании финикийских моряков вокруг Африки, предпринятом во времена правления фараона Нэхо. Историческим фактом являются плавания карфагенского адмирала Ганнона (560 год до н.э.) вдоль атлантического побережья Африки, а также плавание карфагенского мореплавателя Гамилькона вдоль западного побережья Европы к Кассатеридам (*острова Сцилли у юго-западного побережья Англии*), где карфагеняне освоили промышленную добычу олова. Столь дальние походы возможны только при умении ориентироваться в открытом море на большом удалении от побережья. К тому же, необорудованные в навигационном отношении берега не дают морякам укрытий от штормов, а изобилие мелей и подводных скал, непредсказуемость нагонных течений, переменчивость резких ветров и толчея крутых волн на мелководьях всегда являют очевидную опасность кораблекрушений, и потому прибрежье и морские мелководья были и остаются самыми страшными участками морских путей.

Древнегреческие моряки достойно восполнили опыт морских исследований и географических открытий финикиян. Питеас (Пифей), древнегреческий мореплаватель, астроном, математик и географ, между 350 и 320 гг. до н.э. совершил дальний поход вдоль северных и западных берегов Европы. В экспедиционных материалах содержатся правильные описания берегов Португалии и Франции, Бискайского залива и пролива Ла-Манш, островов Сцилли с оловянными приисками, Бристольского залива и побережья Англии и Шотландии до Орк-

[10] Явление магнетизма подмечено людьми еще в глубокой древности. История магнетизма богата наблюдениями и фактами, различными взглядами и представлениями. Свойства магнитного железняка описал Фалес Милетский в VI в. до н.э., он же говорит о его "одушевленности". Высказывания о магнитных явлениях имелись также в сочинениях Эмпедокла, Платона, Лукреция и др.

нейских островов, а также приводятся сведения о существовавшем далее, на полярном круге, острове Туле (Исландия), долго считавшимся северным пределом обитаемой земной поверхности. В другом плавании Питеас посещал побережье Скандинавии, пролив Каттегат, а также – Балтийское море, откуда он привез янтарь (*до этого янтарем торговали только финикияне*). Занимаясь мореходной астрономией, Питеас вычислил наклон плоскости эклиптики к плоскости небесного экватора, а также отметил совпадение моментов полных вод с прохождением Луны через местный меридиан, указав на существование полумесячных неравенств в амплитудах приливов.

Справедливости ради стоит отметить, что великое наследие греческой философии является всего лишь скудным отражением высокой технической культуры античных цивилизаций. В те годы наука имела созерцательный характер, и потому в философских работах лишь частично анализировался богатый опыт по строительству городов и созданию бытовой инфрастуктуры людей. Инженерное использование творческого потенциала науки наступило много и много позже в отличие от географических знаний, активно использовавшихся в управлении обществом и жизненно необходимых для античных путешественников. Так, греческие моряки, наиболее часто посещавшие египетские порты и учившиеся философии и географии у египетских жрецов, оставляют дошедшие до нас изложения о сферичности земли и делают первые попытки изображения земной поверхности на плоскости (Гомер – X столетие и Анаксимандр – VII столетие до н.э.). Магистр Аристотель (384 – 322 гг. до н.э.) уже доказывает, что Земля – это шар, а также вводит плоские и даже вогнутые системы координат, объясняя последнее возможными потребностями инженерных наук того времени. Аристотель признает, что Мировой океан, омывающий сушу, един и указывает, что Атлантический и Индийский океаны только принадлежат его разным частям. Он также пишет о климатических поясах земли, указывая, что Индия и Испания относятся к одному умеренному поясу и что эти страны разделены океаном. Именно это утверждение Аристотеля послужило основанием для организации

дальних морских экспедиций Колумба и Магеллана на поиски западного пути в Индию.

Эратосфен Киренский (ок. 282 – 202 гг. до н.э.) в период максимального расцвета древнегреческой философии был главой Александрийской библиотеки и по праву заслужил звание основателя математической географии. Наблюдая за полуденными высотами Солнца в Александрии и в Асуане, Эратосфен определяет окружность Земли в 250 тысяч стадий, и если допустить, что стадия составляет $^{1}/_{12}$ морской мили, то полученная им точность поражает до сих пор! [11] Он же утверждает, что суша занимает $^{1}/_{3}$ часть земного шара, а $^{2}/_{3}$ – море. Достойны удивления те познания, которые Эратосфен собрал от мореплавателей – современников и, наверное, от хранителей античных естественнонаучных знаний – египетских жрецов. Для построения географических карт Эратосфен Киренский применял *квадратную равнопромежуточную цилиндрическую проекцию*, что в наибольшей степени соответствует современным морским картам в меркаторской проекции.

В дополнение к морским картам всегда составляются подробные описания побережья и морских маршрутов, которые обобщают опыт мореплавателей, посещавших ранее эти морские районы, и включают сведения опытных лоцманов и береговых инженеров, которые специально занимались вопросами навигационного обустройства прибрежных акваторий. Такие сведения собираются в книгах – лоциях (от голландского Loodsen – вести корабль). Лоции содержат подробные схемы расположения фарватеров и береговых ориентиров, в том числе отмеченных на зарисовках берегового рельефа, по которым моряки могут опознать побережье. Древнейшая из сохранившихся лоций была составлена греческим мореплавателем Скилаком (VI век до н. э.), в ней подробно описывались расстояния между портами, их оборудова-

[11] В России приняты размеры земного эллипсоида, вычисленные Ф.Н. Красовским: a=6 356 863 м; b=6 399 699 м; что образует равнообъемный сфероид с радиусом: r=6 378 245 м, длину четверти меридиана равной 10 002 138 м и одну морскую милю как 1852,2464 м. (в системе WGS-84: a=6 356 752,3; r=6 378 137)

ние, якорные места, ветра на маршрутах плавания, глубины и течения, а также навигационные опасности…



Рис. 4. На прибрежных мелководьях *штормовые волны и морская зыбь регуляризуются и усиливаются, плавание судов становится чрезвычайно опасным.*

Мореплавание не стало менее требовательным к профессионализму судоводителей и в современную эпоху космической навигации, а если представить условия плавания на небольших, подверженных всем невзгодам стихии древних кораблях, то уважение к морскому искусству античных моряков становится поистине безграничным. Так, к примеру, Египет веками сохранял за собой статус научного и культурного центра Средиземноморья, куда по морю устремлялось множество искателей истины, торгового люда и просто странствующих путешественников. Однако побережье Египта не обладало ни удобными бухтами, где можно укрываться от штормов, ни безопасными входами в изменчивое устье Нила. Следовательно, морской авторитет этого государства должен был основываться и на существовании эффективно действующей гидрографической и лоцманской поддержки для всех мореплавателей в столь неприветливых прибрежных водах.

В 332–331 гг. до н.э. Александр Македонский основал столицу эллинистического Египта Александрию. Там находился знаменитый Александрийский муссейон – один из главных научных и культурных центров античного мира, а при нём – не менее знаменитая Александрийская библиотека, в которой насчитывалось чуть ли ни 700 тысяч томов греческих и восточных книг. Александрия была самым богатым городом своего времени. Много замечательных сооружений было возведено в Александрии. К ним принадлежит и Александрийский маяк на скалистом острове Форос вблизи дельты Нила. Одно из семи чудес

древнего мира – Александрийский, или Форосский светящийся маяк (рис. 5) был сооружён в 283 г. до н.э. Строительство этого гигантского сооружения заняло всего 5 лет, что само по себе примечательно. Высота маяка огромна: по описаниям Ибн-аль-Сайха (XI в) – 130-140 м. Верхняя башня – фонарь – круглая, с куполом, была увенчана огромной бронзовой статуей покровителя морей Посейдона высотой 8 м.



Рис. 5. Остров Форос, Александрийский маяк

В те времена подходы к острову Форос пользовались дурной славой у моряков. Как сообщает Страбон (60 г. до н.э. – 20 г. н.э.), «… в узком проходе вблизи Фороса есть скалы, одни подводные, другие же выступающие над поверхностью моря; эти скалы постоянно превращают в буруны волны, низвергающиеся на них из открытого моря». Вблизи Фороса мореплавателей поджидали еще и многие другие беды. Это внезапные шквалистые нагоны воды на берег даже в тихую ясную погоду (*сейшевые отголоски дальних или уже отбушевавших штормов*). Это страшные смерчи, нередко сопутствующие сильному горячему ветру, несущему из пустыни массы песка и пыли. Это частые земле- и моретрясения, изменяющие береговую обстановку в мгновение ока: по словам римского ученого Плиния Старшего (23-79 н.э.), например, Форос раньше (*во времена Гомера*) «находился в дне плавания от Египта», то есть на расстоянии порядка 150 км. В дополнение ко всему здесь также возникают частые для Восточного Среди-

земноморья миражи, сбивающие с толку и опытных мореплавателей наших дней.

Предполагается, что история мореплавания изобилует бесчисленными кораблекрушениями, происходившими у истоков многих морских экспедиций, в непосредственной близости от главных центров античного естествознания – Александрийского музея и Александрийской библиотеки. В таких условиях прибрежного мореходства Александрийский маяк являлся жизненно необходимым элементом гидрографического обеспечения подходов к городу и порту Александрия.

Маяк простоял около 1500 лет, неся службу светоча, помогая ориентироваться средиземноморским “кибернетос”, как называли кормчих древние греки. Маяк дважды страдал от землетрясений, но его восстанавливали, пока, наконец, он не разрушился из-за выветривания камня. Затем на развалинах маяка воздвигли средневековую крепость.

И снова изменяющиеся природно-климатические условия привели к ослаблению экономической самостоятельности Египта; разделяя судьбу Малоазийских цивилизаций, в жестокой борьбе за независимость был разрушен Карфаген (146 г. до н.э), затем и античная культура Греции была поглощена молодой Римской империей. И все же Рим так и не добился безраздельного господства даже в своем ближнем Средиземноморье, где постоянно курсировал флот непокоренных и мятежных провинций, отчего географическая экспансия римлян ограничивалась маршрутами их наземных походов по своим обширным владениям.

В то же время совместное сосуществование древних античных народов и молодой римской империи позволило сохранить межнациональную технологическую интеграцию и культурное взаимообогащение народов Средиземноморья. По мере укрепления Римской империи не произошло безвозвратного размежевания с культурным наследием античности, кораблестроительные науки и мореходное искусство частично были восприняты римскими инженерами и мореплавателями, что и заложило морское наследие будущей Европы.

Примечательно, что к началу Новой эры император Гай Юлий Цезарь построил довольно крупный военно-морской флот, что позволило ему не только обеспечить охрану морских рубежей Римской империи, но сделать временно безопасным свободное торговое мореплавание в Средиземноморье. И именно с этим кратким периодом открытого мореплавания совпало активное распространение христианства в Европе, когда миссионеры и морские путешественники не боялись встреч с чужими кораблями, не подчиняющимися римскому праву, а более всего беспокоились о штормах, туманах и других естественных явлениях на море.

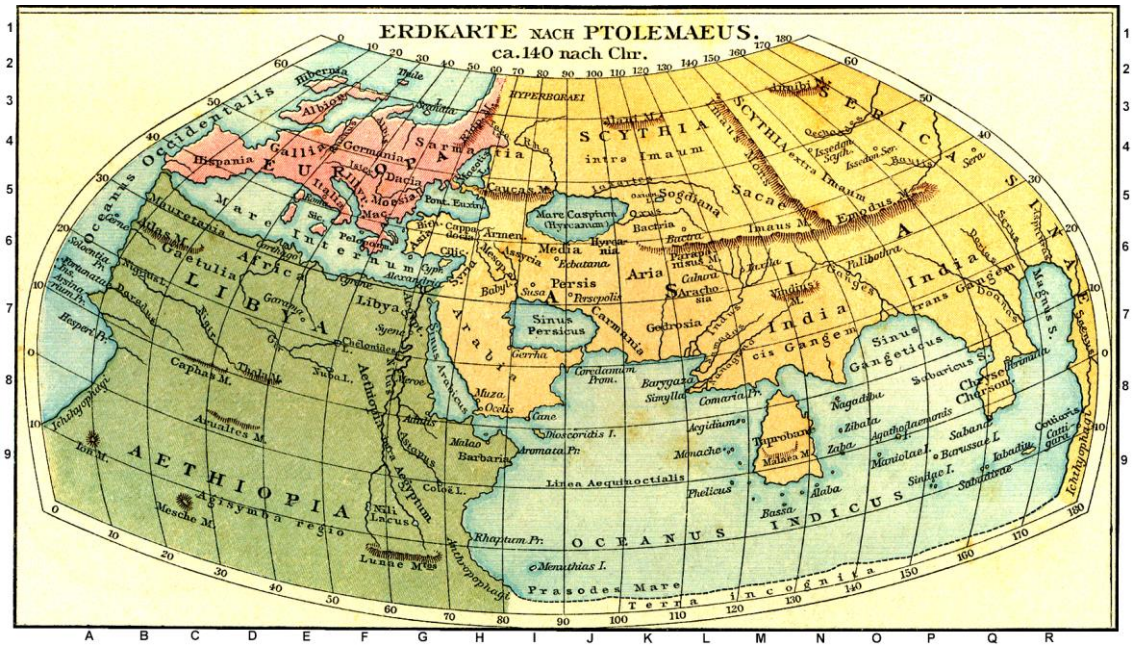


Рис. 6. Карта Птолемея *(II век н.э.) изготовлена в конической проекции, что наилучшим образом соответствует необходимости оценки огромных расстояний генеральной карте Северной Африки и Евразийского континента.*

С началом новой эры средиземноморское мореплавание европейцев теряет былую активность более чем на тысячу лет. Османская империя безраздельно контролирует все морские пути, и вплоть до XIX века все страны, включая Соединенные Штаты Америки, вынуждены откупаться от арабских моряков за возможность безопасного торгового мореплавания в Средиземноморье. Любопытно, что в таких условиях, по заказу римских политиков, вынужденных осуществлять свое владычество с использованием преимущественно наземных коммуни-

каций, сначала Марином Тирским, затем Клавдием Птолемеем все океаны были объявлены внутренними водоемами неразрывной земной суши. Морская наука на длительный срок, вплоть до эпохи Великих географических открытий, стала заложницей новых властителей, основные интересы которых сосредотачивались на сухопутном освоении огромных просторов Африки и Евразии.

Клавдием Птолемеем были собраны все имеющиеся на тот период географические материалы; он построил первую настоящую карту в конической проекции. Составленный им географический атлас содержал около восьми тысяч названий, с указанием широт и долгот для каждого пункта. Когда Палла Строцци привез в Константинополь полный экземпляр "Географии" Птолемея, то его перевод на латинский язык стал, как сказали бы сегодня, одним из "бестселлеров" зарождавшегося книгопечатания! Частично ошибочная, очень неточная во многих своих местах, "География" тем не менее являла собой ощутимый этап в математическом осмыслении мира.

Возрождение и ускоренное развитие морских наук началось в португальском городе Сагрише, в мореходной школе Генриха Мореплавателя (*принц Энрике, 1394-1460 гг.*). Под сенью этого учебного заведения были собраны мореплаватели, географы и ученые всего мира. Только таким образом, после воссоединения утерянных связей между всеми средиземноморскими народами, после объединения их знаний о мореплавании как о единой географической науке, снова стали возможными дальние и длительные океанские экспедиции, что и ознаменовало наступление новой западноевропейской эпохи Великих географических открытий.

Историко-географические исследования все еще таят в себе множество интереснейших открытий, связанных в первую очередь с климатическими циклами на Земле и развитием естественнонаучных знаний, чередующихся с угасанием человеческих цивилизаций.

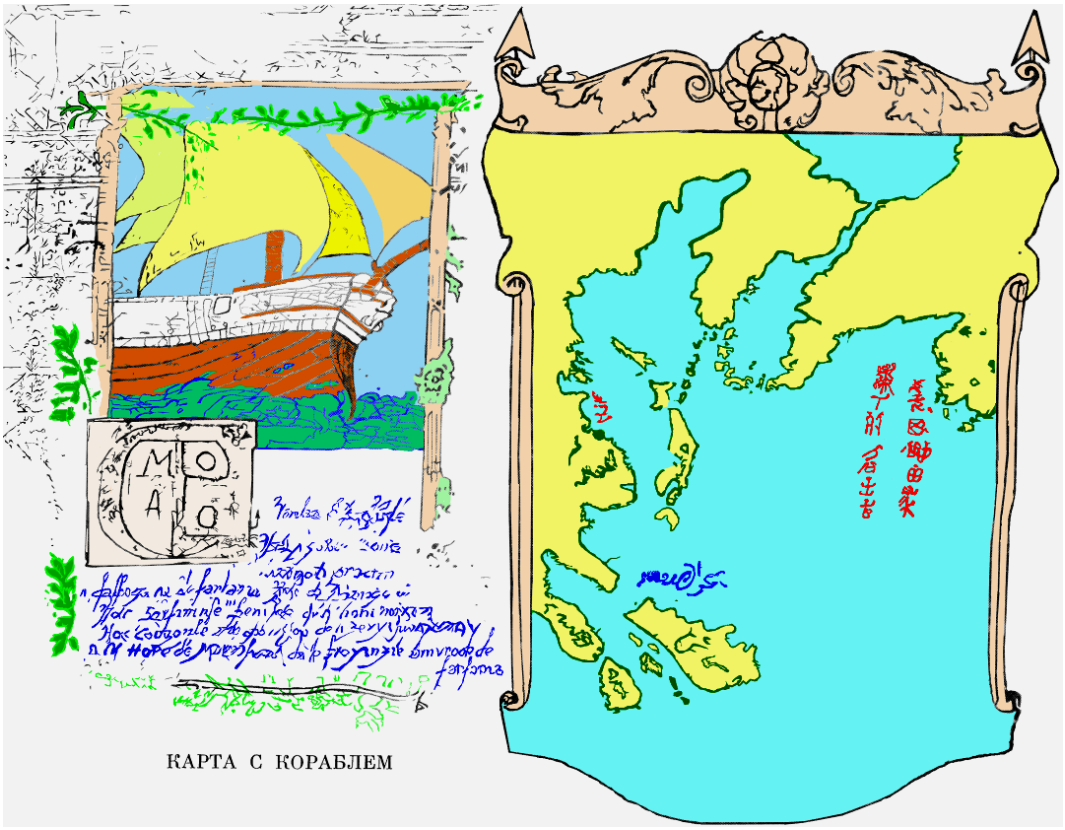


***Рис. 7. «Карта с кораблем»**. Тихий океан по представлениям Марко Поло, вернувшегося в 1292 году из 17-летнего путешествия на Дальний Восток. Карта на пергаменте; размер 19х26 см. Изображенный корабль относится к XIII—XIV векам.*

В XIII веке великий итальянский путешественник – купец Марко Поло, в течение 17 лет знакомился с географическими науками и морскими технологиями Дальнего Востока. Оставленная им «Карта с кораблем», пожалуй, в меньшей степени удивляет достоверностью представления Сахалина, Камчатки, Берингова пролива и Аляски, о которых было известно в Китае, невероятным кажется парусный корабль, изображенный на том же пергаменте, так как его косые кливера и бульбовый нос со штормовым («ледокольным») подрезом форштевня, безусловно свидетельствуют о высоком совершенстве этого корабля, а его внешний облик скорее можно отнести к XIX или даже – к XXI веку.

Морские карты, составленные по небрежным рисункам Марко Поло, фактически являлись той единственной основой для изображения контуров материков на поздних средневековых глобусах, использовавшихся накануне открытия Нового Света. Любопытно также, что

изображенная на «Карте с кораблем» западно-американская Аляска, по-видимому, воспринималась средневековыми географами как восточно-американская Гренландия, что позволяло делать выводы о беспрепятственном западном морском пути в Индию.

Арабский исследователь Ахмед Иби Маджид, бывший лоцманом у Васко да Гама при переходе Индийского океана, в следующих словах рисует совокупность морских познаний, требовавшихся в его время. «Запомни, — пишет он, — о ты, желающий научиться, что моряк должен знать многое. Пойми это. С самого начала ему следует иметь познания в фазах луны, о румбах, путях, расстояниях... Он должен уметь определять высоту звезд, знать признаки пути в порт, время вхождения Солнца и Луны в знаки Зодиака, ветры и муссоны... Нужно, чтобы моряк знал час и место восхода созвездий и равноденствия, способ определять высоту звезды и устройства прибора, восхода и заката звезд, их координаты, расстояния от экватора и полюса, пути, которыми они идут ему должны быть известны все побережья, их пристани и признаки пути к ним, так же, как строение морского дна; растения, встречаемые на водной поверхности, морские змеи, рыбы, травы, изменения цвета воды, приливы и отливы; острова во всех направлениях...»

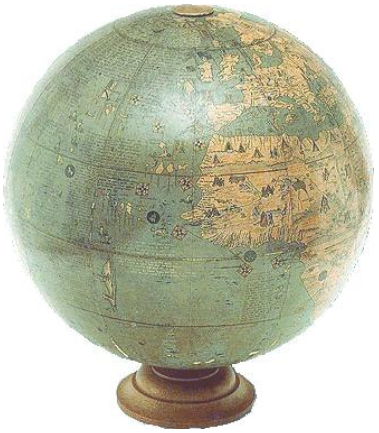


***Рис. 8. Глобус, созданный немецким географом Мартином Бехаймом** в 1492 году, и отражающий средневековые представления о мире накануне открытия Нового Света*

Современное развитие методов навигации находится в тесной связи с изобретением и применением различных технических средств судовождения. Европейская история упоминает о том, что скандинавы пользовались магнитной стрелкой в XI веке, французский поэт Гийо де Прованс упоминает о компáсе в 1200 г. Де Марикур в «Epistola da magnete» (1269 г.) сообщает о применении визиров для пеленгования. Однако существенное развитие компáсного дела и усовершенствование магнитного компáса относятся лишь к концу XIX в.

М.В. Ломоносов в 1759 г. опубликовал свою выдающуюся работу «Рассуждения о большей точности морского пути». В ней он исследовал теоретические вопросы кораблевождения и предложил новые навигационные приборы, в том числе механический лаглинь для постоянного измерения скорости корабля. Гакабортный лаг «Черуб» был впервые применен Уокером в 1878 г.

Современная навигационная карта в меркаторской проекции предположительно была известна Эратосфену, в средние века называлась проекцией Генриха Мореплавателя, а в 1569 г. Меркатор лишь указал на преимущества для мореплавания этой равноугольной[12] карты и присущего ей свойства изображать маршрут судна на постоянном курсе (*локсодромию*) простейшим образом – в виде прямой линии.


Леонард Эйлер

Леонард Эйлер разработал методы определения долготы места по положению светил на небесной сфере. Его метод определения долготы по лунным расстояниям, применявшийся мореплавателями до конца XIX в., явился значительным вкладом в гидрографическую науку и практику кораблевождения. Современная морская навигация в большой степени связана с радиоэлектронными средствами наземного и космического базирования, а управление кораблем все чаще поручается бортовым счетно-решающим автоматам.

Российский Дальний Восток

Замечательную страницу в историю географических открытий в XVI— XVII вв. на Севере и Дальнем Востоке вписали русские море-

[12] Навигационная карта в меркаторской проекции обладает свойством правильного указания угловых величин, курсов, пеленгов и азимутов в любой точке поверхности карты, независимо от широты. В математике такие проекции называются конформными. Расстояния на меркаторской карте пропорциональны косинусу широты. Масштаб каждого листа навигационной карты определяется только одной – приведенной широтой карты.

ходы и путешественники, составившие свои донесения в виде приближенных карт и чертежей. Первое известие о Восточном океане[13] было доставлено в Якутск и оттуда в Москву в 1639 г. Иваном Москвитиным, а наиболее крупными экспедициями к берегам дальневосточных морей стали экспедиции землепроходцев Василия Пояркова в 1643-1646 гг. и Семена Дежнева в 1648 г.

Однако подлинную государственную значимость гидрографические исследования приобрели в эпоху Петра I, когда возникла острая необходимость в обеспечении безопасности плавания строившегося военно-морского флота. Изучение водных путей для установления контактов с внешним миром стало одним из основных дел Петра I. Первыми научными исследованиями, которыми начал заниматься молодой царь, были гидрографические работы – съемки реки Дон от Воронежа, где начал строиться флот, до Азова, выполнявшиеся под руководством вице-адмирала Корнелия Крюйса в 1696 г.

В 1718 г. в Санкт-Петербурге создается Адмиралтейств-коллегия – высший административный орган управления флотом, к которому перешло руководство всеми морскими экспедициями, гидрографическими и картографическими работами. Тем не менее, Петр I по-прежнему лично принимал решения о производстве описи различных морей и организации самих экспедиций. До последних дней жизни он живо интересовался всеми вопросами, связанными с выполнением гидрографических работ в России.

Первые гидрографические исследования Восточного океана по поручению Петра I выполнены в 1719 г. под руководством выпускников Санкт-Петербургской морской академии – геодезистов И. М. Еврейнова и Ф. Ф. Лужина, которым предписывалось выяснить «сошлась ли Америка с Азией», так как об открытии Семеном Дежневым пролива между Азией и Америкой к тому времени было забыто.

[13] *Восточный океан* – наиболее употребительное название *Великого*, или *Тихого*, океана вплоть до второй половины XIX века.

По материалам этой экспедиции была составлена карта Охотского моря с Курильскими островами, основанная на астрономических пунктах, однако дойти до пролива экспедиция не смогла, и вопрос о соединении Американского и Азиатского континентов остался открытым. Это послужило поводом организации Адмиралтейств-коллегией первой Камчатской экспедиции (1725-1730 гг). Петр I собственноручно пишет наказ: *«1) Надлежит на Камчатке или в другом таможе месте сделать один или два бота с палубами. 2) На оных ботах плыть возле земли, которая идет на норд и по чаянью (понеже оной конца не знают) кажется, что та земля часть Америки. 3) И для того искать, где она сошлась с Америкой»*. Командовать экспедицией Петр повелел капитану-командору Витусу Берингу, помощниками ему назначались Алексей Чириков и Мартын Шпанберг. В июле 1727 года вся экспедиция собралась в Охотске. Еще год ушел на то, чтобы доставить грузы на Камчатку и построить корабль. 8 июля 1728 года его спустили на воду и дали имя «Гавриил», Вскоре корабль вышел в море. Первая камчатская экспедиция произвела опись северо-восточного берега Азии от реки Камчатка до мыса Дежнева и далее по параллели 67°19' северной широты. Результатом ее деятельности явилась карта северо-восточных берегов России. Она сразу же вошла во все атласы мира.



Рис. 9. Пакетботы «Святой Петр» и «Святой Павел» *стали первыми русскими кораблями, построенными на Дальнем Востоке*

28 декабря 1732 г. указом Сената была организована вторая, получившая название Великой северной экспедиции. Весной 1735 г. в Охотске заложили два крупных корабля, и в июне 1740 г. пакетботы «Святой Петр» и «Святой Павел» – были спущены на воду (рис. 9). Длиною в 80 футов, шириною 22 фута и с осадкой в 9,5 фута, корабли поднимали по 6 тыс. пудов груза, имели по две мачты с бригским вооружением и по 14 небольших пушек. На «Святом Петре» было 77 человек. Командовал кораблем Беринг. «Святым Павлом» командовал капитан Чириков, при котором состояли лейтенанты Чихачев и Плаутин, штурманы Дементьев и Елагин. На пакетботе – «комплект служителей всех чинов 69 человек, да астрономии профессор один, при нем два солдата, да слуг офицерских три человека, итого всех чинов 75 человек.

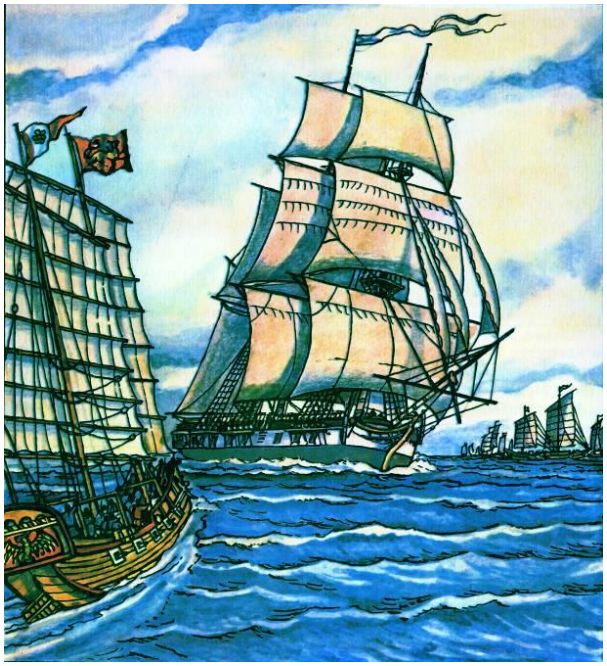


Рис. 10. Шлюпы «Надежда» и «Нева» *прошли проливом Дрейка в Тихий океан и открыли морской путь на Российский Дальний Восток. Крупный океанский флот Китая в те времена был блокирован национальными междоусобными конфликтами и уже не совершал регулярных дальних походов на север Тихого океана.*

8 сентября 1740 г. экспедиционные корабли покинули Охотск. Задержавшись в Большерецке-на-Камчатке, они почти через месяц прибыли в Авачинскую губу. С этого времени поселок на ее берегу стал называться Петропавловском. Простояв больше полугода в гавани, 4 июня 1741 года оба корабля вышли в Тихий океан, и 15 июля «Святой Павел», а 16 июля «Святой Петр» раздельно достигли берегов Америки, описав на обратном пути гряду Алеутских и Командорских островов.

7 августа 1803 года Александр I лично провожал из Петербурга шлюпы «Надежда» и «Нева» с русскими экипажами на борту, и 25 ноября русские моряки

впервые пересекли экватор. Пройдя вокруг мыса Горн, И.Ф. Крузенштерн произвел опись северной части Курильской островной дуги, нанес на карту заливы – Анива и Терпения. В 1805 г., обогнув о. Сахалин с севера, спустился до устья Амура, где встретил сильное пресноводное течение с юга.

Небольшие парусники под командованием И.Ф. Крузенштерна и Ю.Ф. Лисянского в 1803-1806 гг. обошли вокруг земного шара, открыли и описали многие острова Тихого океана. Подробные путевые журналы, дневники и иллюстрации офицеров Первой русской кругосветной экспедиции до настоящего времени служат важным историческим свидетельством о Сахалине и Курильских островах начала XIX века, до начала эпохи интенсивного вовлечения дальневосточных цивилизаций в общемировую политику.

На парусных шлюпах «Восток» и «Мирный» Ф.Ф. Беллинсгаузен и М.П. Лазарев в 1821 г. открыли и описали новый материк — Антарктиду.

Ф.П. Литке на бриге «Новая Земля» в 1821-1824 гг. произвел съемку островов Новая Земля в Северном Ледовитом океане. До этого Литке совершил кругосветное плавание на шлюпе «Камчатка» с заходом в Петропавловск-на-Камчатке и Русскую Америку на Аляске. В 1826-1829 гг. он совершил второе кругосветное плавание на шлюпе «Сенявин». Вместе с Ф.П. Врангелем и К.П. Бэром он выступил с инициативой создания Русского географического общества, первое Собрание которого прошло 19 сентября 1845 года. Покровителем общества стал Государь Император Александр Николаевич, первым председателем – Государь великий князь Константин Николаевич. Ф.П. Литке, как вице-председатель, руководил работой общества с 1846 г. С 1864 по 1880 гг. он же возглавлял – Петербургскую академию наук.

Мореплаватели всегда были передовыми деятелями русского общества. Благодаря участию в русских кругосветных плаваниях видных ученых мировая наука обогатилась материалами по многим отраслям знаний, по совершенно неизученным до этого явлениям и странам. Памятниками мореплавателям, прославившим Россию и

поднявшим мореплавание страны на новую высоту, служат многочисленные русские названия в различных пунктах Мирового океана. Во многих уголках света сохранились и имена самих мореплавателей. Бурное развитие мореплавания с середины 1850-х гг. потребовало активизации гидрографических работ на морском побережье и значительного улучшения корабельного навигационного оборудования.

Исследование и освоение заснеженных дальневосточных территорий и океанских берегов в северной части Тихого океана приходится на очень сложный исторический период – на середину XIX века, и связано с именем мореплавателя адмирала Геннадия Ивановича Невельского, с именами его доблестных сподвижников. Г.И. Невельской на военном транспорте «Байкал» в 1848-1849 гг. совершил переход с Балтийского моря в Тихий океан, исследовал Амурский лиман и установил, что Сахалин является островом, показал фарватеры по которым в Амур могут проходить морские суда. Транспорт «Байкал», фрегаты «Аврора», «Диана» и «Паллада» образовали в те годы как основу Дальневосточного военно-морского, так и научно-гидрографического флота России. Возглавляемая адмиралом Г.И. Невельским Амурская экспедиция (1950-1856 гг.), основанные в ее ходе многочисленные посты в устье Амура и на острове Сахалин, позволили без единого выстрела отстоять Приморье, Приамурье и Сахалин для Отечества.

Одно только перечисление научно-практических достижений российских гидрографов, картографов и геодезистов не даёт полной картины совершённых ими подвигов во имя будущего освоения планеты. Во все времена у них было нежно-трогательное отношение к своим измерительным инструментам, мастерство и умение в их изготовлении, выверке, использовании и ремонте. Всегда геодезические, картографические и гидрографические работы по своей точности значительно опережали многие практические науки своего времени. Строжайшая сохранность и секретность итоговых материалов экспедиций, полное понимание важности работ для государства, братское отношение к коллегам по совместным экспедициям.



Рис. 11. Фрегаты «Аврора», «Диана», «Паллада» и военный транспорт «Байкал» *составили Тихоокеанский флот Амурской экспедиции адмирала Г.И. Невельского, противостоявший объединенной англо-французской эскадре. В соответствии с действовавшими тогда соглашениями, действия русской миссии согласовывались с китайскими властями в Пекине. Но главными союзниками русского флота оставались только холодные ветра, постоянные туманы и неистовые шторма дальневосточных морей.*

Независимо от политической обстановки, погодных условий, состояния собственного здоровья – экспедиционные работы выполнялись с надлежащей тщательностью. Стоит отметить тот факт, что в мирное время все корабли Российского флота широко привлекались к обеспечению гидрографических исследований. Месяцами броненосец мог ждать у заданного участка побережья прибытия исследователей для их последующей доставки в порт или на другой маршрут.

Практика штормового мореплавания

Достижения науки, естествознания и техники концентрируются в морских технологиях и кораблестроительной практике, обусловливая эффективность мореходства и безопасность человеческой жизни на море. И все же существует некий водораздел между корабелами и мореплавателями, поднявшись на который можно познать сложности и единство морских наук.

Любые работы на море, как строительство флота, так и обустройство прибрежной инфраструктуры, требуют огромных капитальных вложений. Именно поэтому комплексное изучение мореходства во взаимосвязи кораблестроительных и навигационных наук, поиск путей сквозной непротиворечивой оптимизации всех вопросов, связанных с проектированием нового флота и его практической эксплуатацией, с обязательным учетом штормовых условий северных морей, представляется актуальной научной задачей экономического развития Дальнего Востока России.

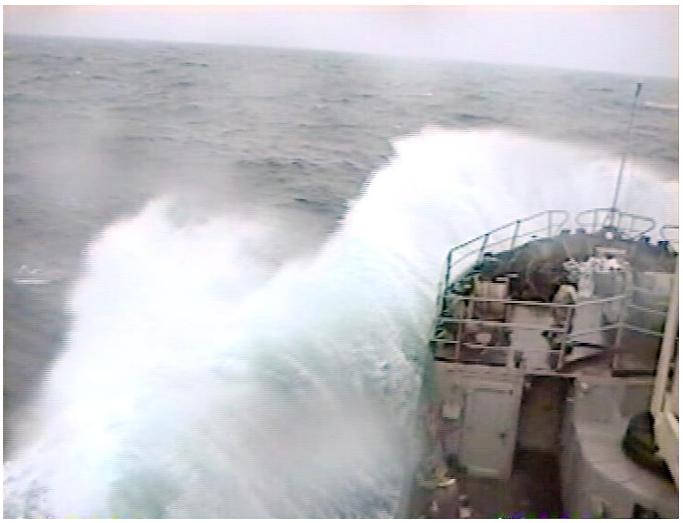


Рис. 12. Интенсивное воздействие морских волн *на корпус гидрографического судна при относительно тихой погоде в Охотском море.*

Вопросы проектирования портовых сооружений, выбора и обустройства безопасных морских гаваней в основном решаются с использованием тех же научных подходов и математических методов, что и проектирование морских судов как плавучих инженерных сооружений. На всем побережье о-ва Сахалин нет ни одного надежного всепогодного порта-убежища. И если, к примеру, на нефтепромысловые акватории северо-восточного шельфа Сахалина требуется привести тяжелую судоподъемную и берегоустроительную

технику, то судовладельцы рискуют потерять ее даже в случае поступления своевременных штормовых предупреждений – слишком далеки ближайшие крупные порты–укрытия в Японии и Приморском крае. И только должным образом обустроенное морское побережье дает возможность использования маломерного флота и громоздких маломореходных инженерных сооружений при освоении сахалинского шельфа.

Из этого следует, что любые российские или иностранные плавсредства, предназначенные для работы в Сахалинской области, должны обладать достаточной мореходностью и способностью к длительному автономному плаванию в условиях дальневосточных ураганных штормов. Такие условия освоения морских ресурсов удорожают экономику мореходства, а флот повышенной мореходности обходится значительно дороже как при строительстве, так и при последующей его эксплуатации. Морские суда повышенной штормовой мореходности должны иметь большую осадку, и для них требуются глубоководные порты, как Корсаков, Холмск и др. Ничем не оправданный вывод из эксплуатации малых портов-ковшей и обустроенных в навигационном отношении устьев рек лишает сахалинцев прибрежного флота и каботажных морских коммуникаций (*издержки сплошной автомобилизации*).

Сбалансированное восстановление морской экономики Сахалинской области и Курильских островов должно быть связано с комплексным обустройством морских акваторий, соответствующих условиям мореплавания в дальневосточных морях России: 1) внедрение в морские службы телеметрических потоков о состоянии моря и атмосферы, обеспечивающих получение достоверный информации о текущей обстановке на море, и выработку прогнозов о динамике изменения состояния моря и атмосферы для всех судов, находящихся в море; 2) создание судовой измерительной и счетно-решающей аппаратуры, оценивающей состояние моря, атмосферы и их взаимодействие с движущимся кораблем, способной выполнять роль бортовой экспертно-аналитической системы, рекомендующей судоводителю различные варианты решения поставленных перед судном задач; 3) по-

иск непротиворечивых методов проектирования новых кораблей и судов, наилучшим образом адаптированных к безопасному плаванию и эффективному выполнению поставленных задач в сложных, ледовых и штормовым условиях.

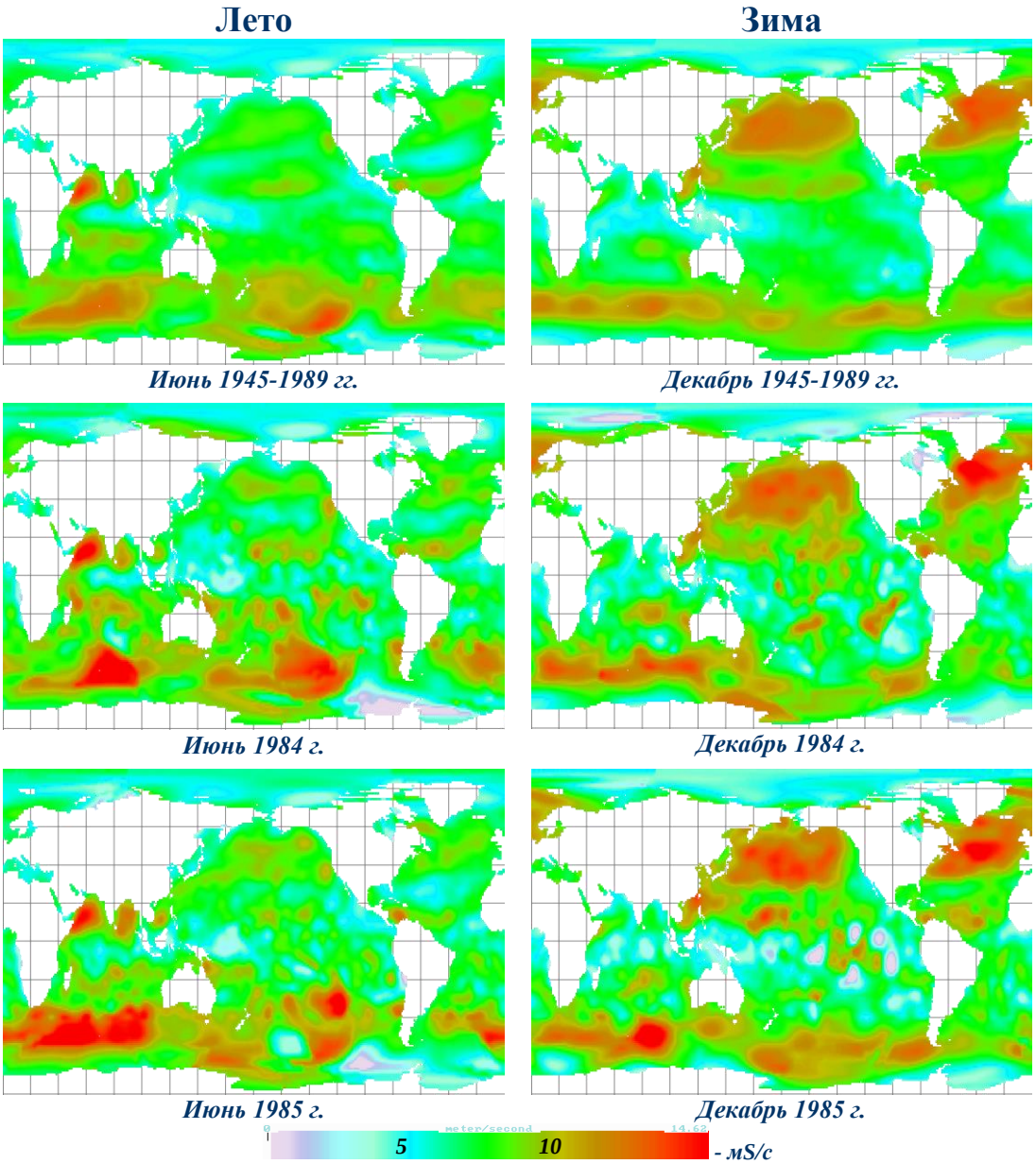


Рис. 13. Характерные карты штормовых ветров Мирового океана для летних и зимних месяцев. *Верхние два рисунка дают осредненные оценки ветров за 45-летний период, а пары нижних - характер изменчивости среднемесячных величин ветров на примерах 1984 и 1985 гг.*

При эффективной работе систем мониторинга морских акваторий и бортовых экспертно-управляющих комплексов судовождения может стать допустимой эксплуатация небольших маломореходных судов в

штормовом море, или, по крайней мере, это придаст морякам большей уверенности в том, что штормовая непогода и аварийные неурядицы на море не обратятся морскими катастрофами.

Штормовые случаи

11 января 1996 года *в 06 часов утра по сахалинскому времени при переходе из порта Корсаков в порт Холмск в условиях жесткого шторма опрокинулся и затонул на траверзе мыса Лопатина, в дистанции 1,5 мили (координаты 46°36' с.ш. 146°46,6' в.д.), производственно-транспортный рефрижератор (ПТР) «Сисафико-02*[14]*». В результате кораблекрушения из находившихся на борту судна 9 членов экипажа 5 чел. погибли.*

Гидрометеорологические условия: ветер северного направления 20 м/с и порывами до 35 м/с, высота волны 3-4,5 м, снежные заряды и ограниченная видимость, температура воздуха 5-7° мороза, темное время суток.



Рис. 14. Маяк «Свободный», *о.Сахалин*

Так представляется заключительное сообщение о штормовом кораблекрушении в сборнике материалов Управления мореплавания Комитета по рыболовству России: «Безопасность мореплавания и ведения промысла» [№ 1(103), 1996 г, стр. 24-34].

Утром 8 января ПТР «Сисафико-02» после получения благоприятного прогноза погоды вышел из порта Корсаков в порт Холмск. При подходе к мысу Крильон (о-в Сахалин) погода резко ухудшилась, и в ожидании ее улучшения капитан принял решение отстояться на якоре в бухте Морж, берега которой прикроют судно от ветров северных и

[14] Валовая вместимость 190 рег.т, мощность главного двигателя 232 кВт. Судовладелец - Акционерное общество закрытого типа (АОЗТ) «Сисафико».

западных направлений. 10 января капитан судна доложил о возможности дальнейшего следования, однако получил указание оставаться на месте до утра 11 января, так как, согласно прогнозам, наблюдаемое улучшение погоды – только временное явление. К концу суток 10 января ветер изменил направление на восточное и усилился до 15 м/с, в связи с чем капитан принял решение следовать в район мыса Кузнецова для укрытия от ветров восточных направлений. В 22 часа судно снялось с якоря и последовало в указанный район. Прибыв к назначенному ранее месту якорной стоянки, капитан изменил свое первоначальное намерение и решил следовать по назначению в порт Холмск. Новое решение капитана основывалось на том, что на всем пути следования наблюдался восточный ветер 8-10 м/с, волнение моря до 1 м, и такие условия позволяли беспрепятственно продолжать плавание.



Рис. 15. Вид штормового моря с борта рыболовного сейнера

Следует отметить, что общая оценка состояния погоды и возможности продолжения рейса подтвердились справкой Сахалинского УГМС и расчетом средней скорости судна на переходе от бухты Морж до мыса Лопатина. В 02 часа 11 января, пройдя в полутора милях траверз мыса Кузнецова, капитан сдал ходовую вахту старшему помощнику с указанием следовать по назначению. Около 5 часов утра сложились крайне неблагоприятные погодные условия: сильный се-

верный ветер до 23 м/с, крупная зыбь до 4 м и обильный снегопад. Примерно в 05 часов 40 мин. был вызван на мостик капитан.

Так как судно следовало курсом 10 градусов (практически против ветра и волны), капитан, оценив обстановку, через 10 минут дал команду рулевому повернуть на 180 градусов и лечь на обратный курс, при этом уменьшил ход до малого. Понаблюдав за поведением судна на заданном курсе в течение 5-7 минут, он спустился к себе в каюту, чтобы одеть теплую одежду, но был вынужден тотчас вернуться на мостик, так как судно вдруг резко завалилось на правый борт и его крен достиг 50 градусов, а верхнюю палубу по правому борту заполнила большая масса воды, уровень которой доходил до верхней кромки носовой тамбучины. Судно застыло в этом состоянии, не выравнивалось и медленно разворачивалось влево лагом (бортом) к волне при положении руля право на борт и работе машины малым ходом вперед. Спустя считанные секунды при очередном накате волны судно полностью легло на правый борт и больше не выправилось.

Через несколько минут на надстройке в районе спасательных плотов[15] собрался весь экипаж судна. Темное время суток зимнего навигационного сезона существенно затрудняло работу со спасательными средствами. Пять членов экипажа, оказавшихся на частично поврежденном плоту, внутрь которого проникали ледяные потоки штормовых волн, не смогли дождаться спасательного судна. Другой плот, находясь в свободном дрейфе около 15 часов, также испытывал мощные удары волн, одной из которых у него был разорван носовой вход, и, хотя повреждение удалось устранить, набравшуюся внутрь воду пришлось удалять всеми подручными средствами. Оба спасательных плота, рассчитанные на 10 чел., не выдержали ударов штормовых волн при нагрузке в 4-5 чел., тем не менее, их штормовая устойчивость оказалось выше чем у погибшего морского судна.

Безусловно, причиной гибели стал отказ от активного штормования с ходом навстречу штормовой волне, при котором судно все

[15] Плоты спасательные надувные, ПСН-10 - 4 шт., по 2 на левом и правом бортах, вместимость каждого - 10 чел.

дальше и дальше уходило бы из под прикрытия берега, встречая усиленное волнения открытого моря. Несправедливо также винить капитана за его слишком предусмотрительное снижение хода до малого, так как на полном ходу, при захвате корпуса попутной волной и при недостаточной опытности рулевого мог бы произойти очень быстрый поворот судна на курс лагом к волне с мгновенным опрокидыванием и гибелью всего экипажа. В свободном же плавании аварийное судно продержалось еще 20 минут, опрокинувшись вверх килем через 2-3 минуты после отхода последнего спасательного плота.

Об умеренных условиях штормового плавания свидетельствует также тот факт, что один из спасательных плотов смог безопасно дрейфовать в штормовом море до 21 час. 20 мин., пока его не обнаружили с берегового поста на расстоянии 3 – 3,5 миль от берега и не подняли из воды на СТР [16] «Камский».

Главной причиной гибели судна может быть признана только его недостаточная штормовая мореходность, выразившаяся в проектных недостатках формы корпуса, неспособного безопасно держаться на штормовой волне даже при исправно работающих двигателях. Следует также признать, что гибель подобных судов будет предрешенной в случае остановки главных двигателей или рулевых машин. Другой причиной, видимо, явилось поперечное смещение грузов внутри корпуса, отчего судно не смогло выпрямиться после накренения на 50°. Проблему возможного смещения грузов также необходимо отнести к чисто конструктивным недостаткам судна. Если корпус малого судна проектировался для плавания при хорошей всхожести на волну, то в его эксплуатационных режимах должны предусматриваться сильные накренения и интенсивная килевая качка, приводящая к превышению ускорения свободного падения в оконечностях корпуса, соответственно планирование внутренних отсеков должно обеспечивать недопустимость свободного перемещения грузов с одного борта на другой.

28 декабря 1995 г. *примерно в 09 час. 20 мин. (время московское) в Норвежском море в координатах 70°31’,9 с.ш., 19°38’,6 в.д. при сле-*

[16] СТР – сейнер-траулер рефрижератор.

довании из района промысла в Данию для сдачи груза затонул СРТМ «Новгородец»[17]*. В результате кораблекрушения погибли 10 из 25 членов экипажа траулера.*

Гидрометеорологические условия на момент катастрофы: ветер северного направления 12-15 м/с, высота волны 3-4 м, снежные заряды, ограниченная видимость (100-200 м) и интенсивное обледенение.



Рис. 16. Обледенение среднего рыболовного траулера «Нептун». *Прячась от ледяных брызг, траулер вышел на прибрежное мелководье, а при отливе накренился, став килем на морское дно.*

Средний рыболовный траулер морозильный, является довольно крупным судном, и в таких гидрометеорологических условиях он мог бы продолжать работу с орудиями лова на любых курсах относительно волнения. 24 декабря траулер «Новгородец» завершил работу в Баренцевом море и с полным грузом мороженой рыбной продукции снялся с промысла и вышел вдоль побережья в Норвежское море. Ветер и волнение на море способствовали интенсивному обледенению, однако капитан не особо тревожился о постоянном крене около 2-3° на правый наветренный борт. Освещенность в зимнем плавании за полярным кругом не превышала уровня навигационных сумерек (при которых не гаснут звезды), тем не менее, экипажу не менее двух раз в «дневное» время суток приходилось скалывать лед. В 5 часов утра 26 декабря, старший помощник капитана, заступив на ходовую вахту, обеспокоился заметным усилением крена на правый наветренный борт и отправил стар-

[17] СРТМ – средний рыболовный траулер морозильный. Валовая вместимость 744 рег.т, мощность главного двигателя 726 кВт, район плавания судна неограничен. Судовладелец – ООО «Сойма», входящее в Союз рыбопромышленников Севера.

шего рыбмастера проверить состояние грузов в носовых морозильных трюмах. Северный ветер дул с кормовых румбов правого борта, отчего из ходовой рубки шторм казался не столь опасным, однако с палубы проверить состояние трюмов не представлялось возможным из-за сильной бортовой качки и постоянной заливаемости большой промысловой палубы СРТМ.

Заметим, что по условиям организации службы на российских рыбопромысловых судах, наиболее опытные рулевые традиционно несут вахту с третьим штурманом или со вторым – грузовым помощником капитана. Причем, в обязанности старшего рулевого, который в сложных условиях плавания должен бессменно находиться у штурвала, нередко вменяется еще и заведование артелкой (*провизионным складом*), отчего самая сложная в навигационном отношении утренняя старпомовская вахта, называемая иногда «собачьей», достается молодым и не самым опытным матросам.

Итак, старпом, заполошенный разборками с рыбмастером о правильности заполнения пространства носового трюма, не очень-то следит за действиями своего вахтенного матроса у штурвала. Не исключено также, что он использует его на посылках или палубных работах с проштрафившимся рыбмастером, доверяя штормовое управление судном авторулевому, так как и сам-то старпом тоже не может прерывать суету своих многочисленных утренних распорядительных забот.

Около 7 часов утра на верхнюю палубу «Новгородца» с правого борта заходит очередная крупная волна, судно сильно кренится на наветренный борт, сливая образовавшееся на промысловой палубе обширное «озеро» прямо через фальшборт, а в следующем такте штормовой качки у траулера обнаруживается постоянный крен на правый борт, достигающий 30°.

Попытка вывести судно на штормовой курс носом на волну заканчивается поломкой рулевой машины. Сложились все признаки близкого кораблекрушения.

Штормовые поломки рулевого управления очень характерны для данного типа судов, если во время шторма на них задействуется авторулевой типа «Аист». «Аист» умеет очень быстро вертеть балером,

вихляя рулем чуть ли ни с борта на борт (*причиной тому является явное несовершенство математической модели управления, заложенной в этот автомат*). Внешней причиной являются особенности гирокомпáса, чувствительный элемент которого реагирует не только на рыскание судна на курсе, но в еще большей степени подвержен сильным инерционным воздействиям при его бортовой качке (*гирокомпáс на СРТМ установлен не в центральной части корпуса, а по левому борту высоко над водой – в ходовой рубке, выше – только мачта*).

Объявляется судовая тревога, и старпом дает распоряжения о восстановлении ручного рулевого управления, перекачке топлива и балласта, перегрузе рыбопродукции в трюме и траловых досок на палубе на левый борт. Все тщетно, и ровно через час развития аварийной ситуации, в 8 часов утра капитан дает команду об оставлении гибнущего судна.

Отметим здесь, что у этого типа траулера очень широкие морозильные трюма, которые никак не оборудованы для раскрепления навалочных грузов. То есть трюм по условиям штормового плавания должен заполняться полностью, под самый подволок. Не исключено, что рыбмастер пытался упорядоченно укладывать различные виды мороженой рыбопродукции, оставляя как недогруженными до подволока штабеля с картонными коробами рыб, так и проходы между ними для удобства контроля при планировавшейся сдаче рыбопродукции в иностранном порту. Такие нарушения в укладке картонных коробов обычно грозят их обрушением на трюмных матросов даже в относительно тихую погоду. На траулере типа СРТМ дела обстояли намного хуже, так как на умеренном и сильном волнении в носовом трюме нередко превышаются ускорения свободного падения, отчего никак не раскрепленные короба мороженой рыбы представляются наиопаснейшим вариантом сыпучего груза.

В районе кораблекрушения у норвежского острова Ванней спасением экипажа «Новгородца» занимались несколько российских судов, работал также норвежский вертолет. Также, как и у транспортного рефрижератора «Сисафико-02», здесь возникают проблемы с посадкой экипажа в спасательные плотики, которые переворачиваются при

спуске на воду и рвутся, когда люди садятся в них, соприкасаясь с судовыми устройствами и выступающей арматурой на палубе сильно накренившегося траулера. Второй помощник капитана руководит работой со спасательными плотами и погибает, оказавшись в ледяной воде у первого плотика, впоследствии разорванного и затонувшего. Два других плотика с 15 членами экипажа отходят от аварийного судна, и пока за ними гоняются спасатели, оставшийся на борту экипаж погибает вместе с затонувшим в 09 час. 20 мин. траулером «Новгородец».

Конечно, надежное крепление разнородных партий мороженой рыбной продукции желательно предусматривать чисто конструктивными способами еще при проектировании и строительстве траулеров. Это особенно актуально в настоящее время, когда рыбный промысел ведется не до полной загрузки трюмов, а лишь строго по квотам на различные виды рыб. А потому трудно винить экипаж в том, что он не предусмотрел и не выполнил множества предупредительных судовых работ, что ходовая вахта слишком передоверилась надежности судовых машин и безусловно высоким штормовым мореходным качествам траулера типа СРТМ. Однако беда не ходит одна, и морская безграмотность рыбмастера, да безопасный только в штилевых условиях «автоломатель» рулевых машин «Аист» вновь привели к трагическим последствиям на умеренно-слабом штормовом волнении.

В практике разбора морских аварий традиционно действует жесткое правило безусловной вины капитана и ходовой вахты, которые задним числом всегда могли бы предусмотреть нечто и предотвратить аварию и гибель людей. Но это «верное» и очень древнее морское правило может быть справедливо только в том случае, если побывавшие в экстремальных ситуациях мореплаватели затем активно участвуют в предотвращении подобных кораблекрушений. А наиболее эффективным путем повышения штормовой мореходности кораблей и судов может быть только привлечение бывалых капитанов и судоводителей к активнейшему участию в выработке ключевых проектных решений при строительстве нового океанского флота.

А потому в заключение анализа штормовых случаев, необходимо вспомнить о судьбе судна с горизонтальной грузообработкой, ролкера «Механик Тарасов».

16 февраля 1982 г. *советское грузовое судно "Механик Тарасов" на пути из Канады в СССР затонуло в 240 морских милях от Ньюфаундленда. Из 37 членов экипажа спасли пятерых.*

15 февраля 1982г. советский теплоход "Механик Тарасов" направлялся через Атлантику из канадского порта Три-Риверс в Гамбург. Он получил сигнал SOS с канадской буровой платформы "Оушен Ренджер". В условиях сильного шторма (*12-метровые волны, скорость ветра до 35 м/с*) «Механик Тарасов» изменил курс и пошел на помощь нефтяной платформе. Через несколько часов волны сбили две колонны носовых трюмных вентиляторов теплохода, и вода стала заливать трюмы и насосы рулевого управления. Так описаны события у берегов Канады в общедоступной литературе[18].

Экипаж до последней минуты верил в надежность своего нового сверхсовременного судна и, не пытаясь его покинуть, отвечал подошедшему на помощь датскому рыболовному судну «Сицурфари»: «Все пока на борту».

Виктор Конецкий[19] отмечает, что «было что-то символическое в том, что к погибающему "Механику Тарасову" первыми на помощь бросились БМРТ[20]-559 “Толбачик” и БМРТ-244 “Иван Дворский”. Профессионалы знают, что высота борта таких судов чрезвычайно затрудняет возможность поднять с воды оказавшихся в море людей. … реальную помощь погибающим оказали датские рыбаки с СРТ[21] “Сицурфари”. *Хотя мы всегда стараемся обойти рыбаков на почтительном расстоянии, я искренне убежден в том, что самые морские моряки — это рыбаки …*».

---

[18] Кораблекрушения /авт.-сост.: Трус Н.Н./ - Мн: Литература, 1998. 640 с.
[19] Виктор Конецкий. Последний рейс. «Знамя». № 12. 2000 г.
[20] БМРТ – большой морозильный рыболовный траулер
[21] СРТ – средний рыболовный траулер

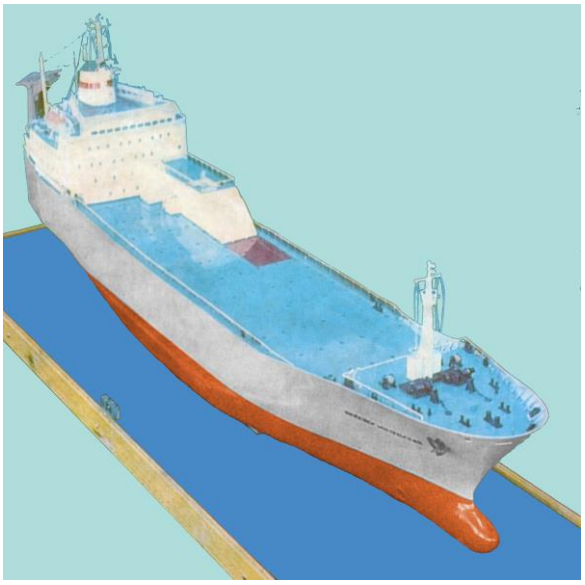


***Рис. 17. Модель судна с горизонтальной грузообработкой – ролкера «Инженер Мачульский»**, фото из журнала «Судостроение» № 6, 1984 г*

Расследование причин кораблекрушения «Механика Тарасова» привело к появлению множества вопросов о штормовых мореходных качествах новейших для того времени кораблей и судов океанского флота. Береговые службы мореплавания, как это общепринято, всю вину за гибель ролкера финской постройки возложили на капитана. Но все же бесконечные дискуссии об этом корабле, в основном носившие технико-политический характер, свелись к четким фразам заключения в форме мелвилловского «косвенного сленга». Что это означает? 1) через воздухозаборники очень высокой верхней палубы ролкера вода может попасть только в шпигаты на его главной водонепроницаемой палубе, никак не повлияв на плавучесть корпуса в целом. 2) гидравлические «насосы» рулевых машин установлены в специально оборудованном кормовом румпельном отделении, находящемся выше ватерлинии.

Шторм был вполне умеренным. В те годы, пока велось расследование причин кораблекрушения, никто не скрывал свидетельств о канадских вертолетах, которые предлагали снять экипаж с подававшего сигнал SOS «Механика Тарасова». Однако экипаж, как один, верил в свое судно и до последней минуты вел борьбу за его жизнь.

Можно ли смягчить вину погубившего ролкер капитана? Да! Простой взгляд на форму корпуса корабля с широкой транцевой кормой, очень высоким бортом и с широкими «развесистыми» носовыми скулами не оставляет сомнений в том, что на умеренном волнении у него возникает интенсивная килевая качка. Если же у такого судна гребни волн попадают на высоченную носовую палубу, то в следующий момент нос корабля может взлететь выше гребней штормовых

волн, явно демонстрируя, что вертикальные ускорения в оконечностях корпуса превышают ускорение свободного падения, характерные для гребней штормовых волн и их девятых валов. В таких условиях контейнеры могут на несколько секунд отрываться от палубы и, оказавшись в невесомости, лететь в сторону пустых твиндеков. Разогнавшись до большой скорости, тяжелые контейнеры способны повредить обшивку корпуса ниже главной водонепроницаемой палубы.

Траулер "Иван Дворский" опоздал буквально на несколько минут. В момент его подхода "Механик Тарасов" уже скрылся в волнах. Люди оказались в бушующем море, в темноте, в ледяной воде, но на спасательных жилетах многих из них вспыхнули лампочки. Только маленький датский траулер "Сицурфари" был способен поднимать моряков из воды. Однако большинство из них погибло от переохлаждения.

P.S.: буровая вышка, к которой так спешил "Механик Тарасов", находилась в 170 милях к востоку от острова Ньюфаундленд, и советские моряки с честью исполнили древнейший морской закон – реально рискуя собственной жизнью – встали на опасный штормовой курс для оказания помощи бедствующим на море.

Гидродинамические условия штормового плавания

Морское волнение и поверхностные течения являются опасными для мореплавания природными явлениями, которые всегда необходимо учитывать как при проектировании нового корабля, так и его последующей эксплуатации. Штормовые условия плавания определяются активным взаимодействием корабля с шквальными порывами ветра и интенсивным волнением, проявляющегося в виде поступательных и круговых движений водных масс, которые могут образовываться в очень широком спектре длин волн и периодов колебаний.

Плавание в прибрежной зоне усугубляется дополнительными опасностями, вызываемыми длиннопериодными колебаниями уровня моря и экстремальными течениями, возникающими в результате трансформации штормовых волн и волн зыби, их активным взаимо-

действием с прибрежными длинноволновыми процессами и осложненными сильной стратификацией плотности воды вблизи устьев рек. При сложении неблагоприятных гидродинамических процессов, судоходство вблизи побережья или проход судов через узкости и ворота морских портов может представлять опасность даже при относительно спокойной погоде.

Классификация морских волн

Морские волны можно классифицировать по различным признакам. По силам, вызывающим волновое движение, т. е. по происхождению, можно выделить в океане (море) следующие виды волн: *ветровые* – вызванные ветром и находящиеся под его воздействием; *корабельные* – создающиеся при движении корабля и тайфунов; *приливные* – возникающие под действием периодических сил притяжения Луны и Солнца; *анемобарические* – связанные с отклонением поверхности океана от положения равновесия под действием ветра и атмосферного давления; *сейсмические* (цунами) – возникающие в результате динамических процессов, протекающих в земной коре, и в первую очередь подводных землетрясений, а также извержений вулканов, как подводных, так и прибрежных; *прибрежные* – сейшевые или захваченные волны, рождающиеся у морского побережья с повышенными резонансными свойствами.

Практически всегда на поверхности открытых морей и океанов наблюдаются зыбь, ветровые и приливные волны. Только ветровые волны и зыбь оказывают непрерывное и повсеместное воздействие на корабль, другие же волновые движения имеют слишком большие периоды и длины волн и могут оказать губительное воздействие на корабль только на мелководье или в непосредственной близости от побережья.

По силам, которые стремятся возвратить частицу воды в положение равновесия, различают *капиллярные и гравитационные* волны. В первом случае восстанавливающей силой является сила поверхностного натяжения, во втором — сила тяжести. Капиллярные волны малы по своим размерам и образуются либо в первый момент воздействия

ветра на водную поверхность (*рябь*), либо на поверхности основных гравитационных волн (*вторичные волны*). В море главное значение имеют гравитационные волны.

По действию силы после образования волны выделяют волны *свободные*, когда сила прекращает действие после образования волны, и *вынужденные*, когда действие силы не прекращается. По расположению различают *поверхностные* волны, возникающие на поверхности моря, и *внутренние*, возникающие на глубине и почти не проявляющие себя на поверхности.

По форме выделяют *двухмерные* волны, средняя длина гребня которых во много раз больше средней длины волны, *трехмерные*, средняя длина гребня которых соизмерима с длиной волны, и *уединенные*, имеющие только куполообразный гребень и не имеющие подошвы. Если на гребне уединенной волны поместить поплавок, он будет перемещаться вместе с гребнем. Поэтому уединенную волну иногда называют переносной волной.

По соотношению длины волны и глубины моря различают *короткие* волны, у которых длина волны значительно меньше глубины моря, и *длинные*, у которых, напротив, длина волны значительно больше глубины моря.

По перемещению формы волны выделяют волны *поступательные,* или *прогрессивные* (рис. 18), видимая форма которых перемещается в пространстве, и *стоячие* (рис. 19), узловые линии и вершины которых в пространстве не перемещаются.

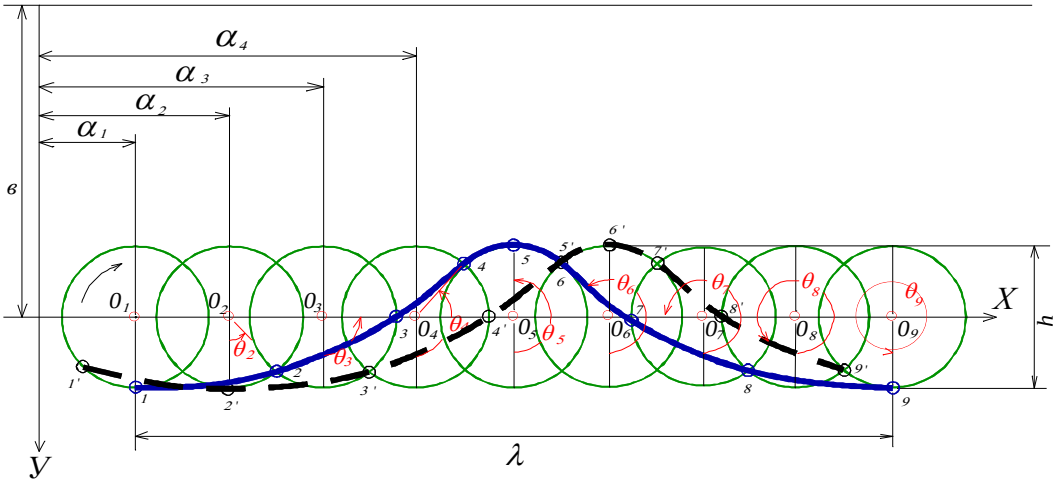


Рис. 18. Поступательная волна и орбита частиц.

Прогрессивные волны характеризуются тем, что у них перемещается видимая форма (профиль) [Егоров, 1974]. Частицы же воды движутся по почти замкнутым орбитам, имеющим форму, близкую к окружности или эллипсу. Любой небольшой предмет, находящийся на поверхности моря, также будет совершать круговые колебательные движения, соответственно движению частиц воды по их орбитам.

Видимое перемещение формы (профиля) волны можно пояснить следующим образом. Предположим, что частицы воды совершают движение по замкнутым круговым орбитам (рис.18). Если импульс силы, вызывавшей волнение, действовал слева, то частицы, действующие правее, придут в движение позже и поэтому будут отставать по фазе от частиц, расположенных левее, и займут в момент времени положения *1, 2, 3* ... Проведя кривую через эти точки, получим профиль волны в момент времени t_1 (сплошная кривая). Теоретически частицы воды движутся по орбитам с одинаковой угловой скоростью. Поэтому в следующий момент времени t_2 они переместятся на своих орбитах на один и тот же угол и займут положения *1', 2', 3'* ... Проведя пунктирную кривую через указанные точки, получим профиль волны в момент времени t_2. Как видно на рисунке, профиль волны сместился в направлении действия силы, хотя частицы воды двигались исключительно по круговым орбитам, вокруг собственных центров вращения.

Стоячие волны. При стоячей волне частицы воды не совершают движений по круговым орбитам (рис.19). В пучностях, т. е. в точках, где амплитуда колебания уровня наибольшая, частицы двигаются только по вертикали. В узлах, т. е. в точках, где колебания уровня отсутствуют, частицы двигаются только в горизонтальном направлении. На схеме показаны три положения поверхности моря при стоячих волнах: два крайних (пунктирные линии) и средние (сплошная линия). Буквой *У* обозначены узловые точки (узлы), а буквой *П* — пучности. Стрелками на линии среднего уровня показаны орбиты частиц в различных точках волнового профиля.

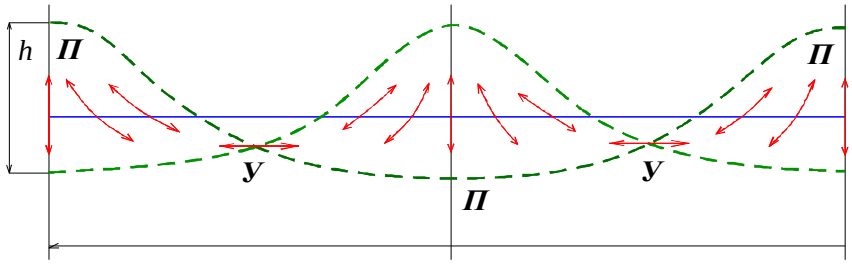


Рис. 19. Схема стоячей волны.

Элементы волны. Каждая волна, поступательная или стоячая, характеризуется определенными элементами. Общими для обоих типов волн являются следующие элементы. *Волновой профиль* – кривая, получаемая в результате сечения взволнованной поверхности моря вертикальной плоскостью в заданном направлении (обычно в направлении распространения волн). *Гребень волны* – часть волны, расположенная выше среднего волнового уровня. *Вершина волны* – наивысшая точка гребня волны. *Ложбина волны* – часть волны, расположенная ниже среднего волнового уровня.[22] *Подошва волны* – наинизшая точка ложбины волны.

Высота волны h – превышение высоты волны над соседней подошвой на волновом профиле, проведенном в генеральном направлении распространения волн. Высота волны равна удвоенной амплитуде или удвоенному радиусу орбиты поступательной волны при круговых орбитах. *Длина волны* λ – горизонтальное расстояние между вершинами двух смежных гребней на волновом профиле, проведенном в ге-

[22] Средний волновой уровень — линия, пересекающая волновой профиль так, что суммарные площади выше и ниже этой линии одинаковы.

неральном направлении распространения волн. *Крутизна волны* – отношение высоты данной волны к ее длине. Крутизна волны в различных точках волнового профиля различна. Для удобства характеристики крутизны волны пользуются отношением высоты к длине *(h/λ)*, называемое средней крутизной волны. Частота формы волны: $k = 2\pi/\lambda$.

Перечисленные элементы определяют геометрические характеристики волны. Для поступательной волны необходимо добавить еще три элемента.

Направление распространения волн, отсчитываемое по часовой стрелке от норда в сторону их движения. *Фронт волны* – линия на плане взволнованной поверхности, проходящая по вершине гребня данной волны, которая определяется по множеству волновых профилей, проведенных параллельно генеральному направлению распространения волн. *Длина гребня волны* – протяженность гребня волны в направлении ее фронта. *Луч волны* – линия, перпендикулярная фронту волны в данной точке.

Кроме элементов, определяющих геометрические характеристики волны, выделяют кинематические элементы. К ним относятся: период волны τ – интервал времени между прохождением двух смежных вершин волн через фиксированную вертикаль. $\sigma = 2\pi/\tau$ – частота проявления волн во времени. Период волны можно определить и как время обращения частицы по ее орбите. Для стоячей волны период определяется промежутком времени, за который совершается полное колебание уровня.

Скорость распространения, или фазовая скорость c – скорость перемещения гребня волны в направлении ее распространения. За время полного оборота частицы по своей орбите[23], т. е. за период волны τ профиль волны сместится на расстояние, равное длине волны λ.

[23] Скорость перемещения частиц жидкости по волновой орбите называют орбитальной скоростью волнового движения

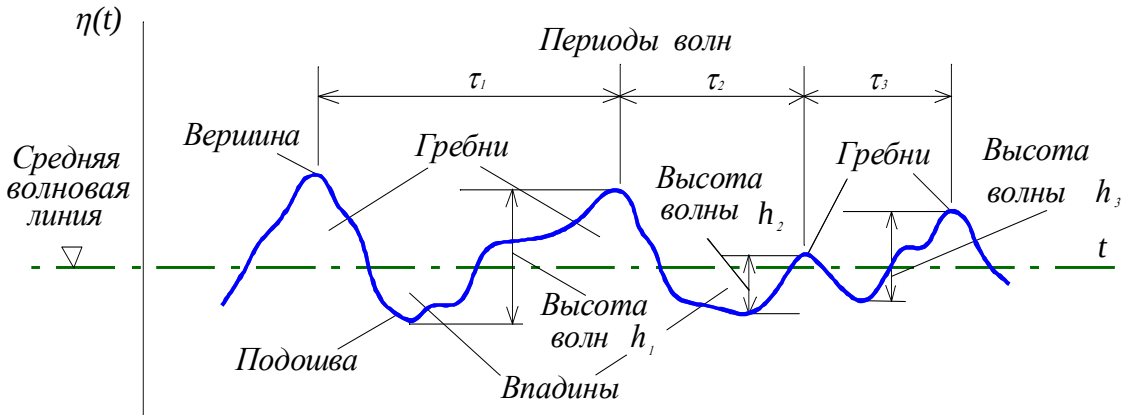


***Рис. 20. Кривая волновых колебаний** свободной поверхности воды в одной точке*

Таким образом определяется фазовая скорость распространения волны $c = \lambda/\tau$. Реальные ветровые волны всегда трехмерные, и для них также, как и для стоячих волн, затруднительно определить период по скорости перемещения гребня. В этом случае вводится понятие периода волны в одной точке (рис. 20).

Поэтому для трехмерных волн вводится еще одно дополнительное понятие – *высота трехмерных волн*. Она находится как разность по вертикали между наивысшим уровнем *вершины*, определяемым как наивысшая точка гребня волны, расположенного выше среднего волнового уровня, и уровнем подошвы, представляющим наинизшую точку ложбины среднего волнового уровня (рис. 21). На схеме трехмерной волны h_T – высота трехмерной волны, определяемая как вертикальное расстояние между высотами уровня в точке *A (вершина)* и *B (подошва)* профиля волны, λ – длина волны, а L – длина гребня.[24]

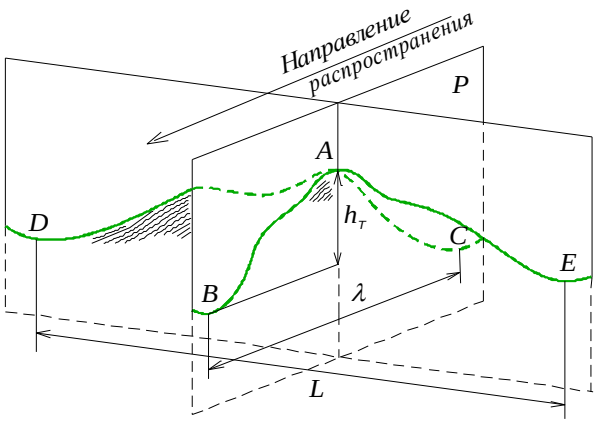


Рис. 21. Схема трехмерной волны.

[24] Длина гребня — горизонтальное расстояние между подошвами двух смежных ложбин на волновом профиле, проведенном перпендикулярно генеральному направлению распространения волн

Построение модели волнового поля на основе реальных наблюдений в штормовом море.

Двумерная модель трохоидальной теории волн на глубокой воде определяет движение частиц жидкости по круговым траекториям, при этом радиус кривизны убывает по экспоненциальному закону с глубиной:

$$r = r_0 e^{-\frac{2\pi}{\lambda} z},$$

где: r_0 – теоретическая полувысота волны на поверхности моря; z – глубина моря.

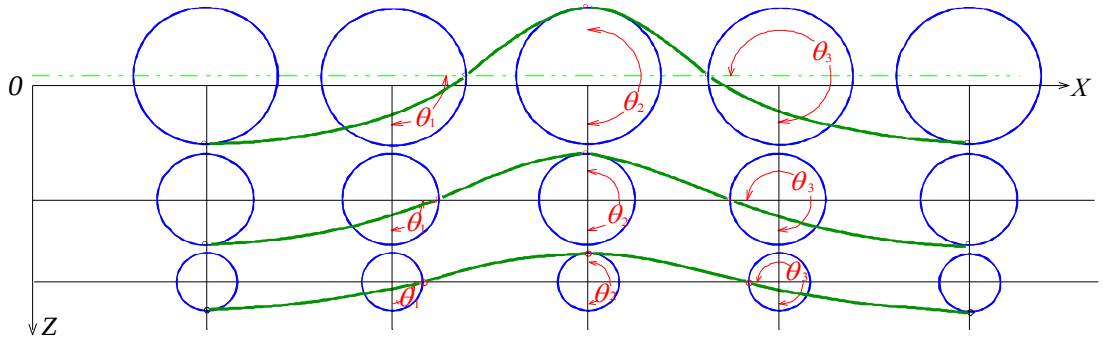


Рис. 22. Орбиты частиц *жидкости и профили волн на различных глубинах*

Соответственно убыванию радиусов орбит частиц убывают и подводные волновые колебания толщи воды:

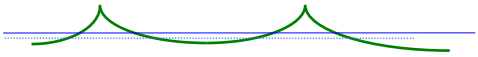
$$h = 2 \cdot r_0 e^{-\frac{2\pi}{\lambda} z},$$

при которых изобарические поверхности расположены дальше друг от друга под гребнем волны, где вес частиц уменьшен центробежными силами, и ближе под подошвой, где он увеличен. Скорость распространения трохоидальной волны зависит только от ее длины:

$$C = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} = \frac{\sigma}{k},$$

с глубиной она не меняется, так же как не меняются период и длина этой волны. Скорость движения элементарных частиц жидкости определяется через произведение частоты колебаний (*круговой скорости*) и радиуса дуги траектории:

$$V_r = \sigma \cdot r = \sigma \cdot \frac{h}{2} e^{-\frac{2\pi}{\lambda} z} = \sigma \cdot r_m e^{-kz}.$$

Скорость движения частиц жидкости возрастает с уменьшением глубины z. На вершине волны эти частицы перемещаются с максимальной скоростью в направлении движения ее гребня. Допустим, что скорость частиц жидкости не должна превышать скорости распространения корабельной волны, так как это является условием разрушения волнового гребня. В этом случае при скорости $V_r = C$, может быть получена оценка максимального радиуса как: $r_m = \lambda / 2\pi$ или высоты волны как $h \cdot k = 2$, что соответствует острому гребню волны, вида:  .

Аппроксимируя экспоненту отрезком прямой линии: $\exp(k \cdot z') \approx 1 + k \cdot z$ и допуская, что на вершине волны $z = h/2$, можно получить другое приближение величины экстремальной амплитуды трохоидальной волны: $h \cdot k = \sqrt{5} - 1 \approx 1{,}236$.

Численное приближение дает предельную оценку теоретической высоты волны как: $\boldsymbol{h \cdot k \approx 1.134}$. При построении прогрессивных волн на свободной поверхности. эта оценка должна использоваться в качестве максимального радиуса трохоиды. Численный расчет экстремумов для такой трохоидальной волны, с учетом снижения амплитуды на подошве волны, приводит к оценке высоты волны как: $\boldsymbol{h \cdot k \approx 0.75}$ или $\boldsymbol{\lambda / h \approx 8.38}$, что соответствует прогрессивной волне с обрушающимся гребнем.

Полученная плоская трохоидальная волна соответствует предельно возможному отношению амплитуды к длине прогрессивной штормовой волны: $\boldsymbol{h = 0{,}375 \cdot \lambda / \pi \approx 0.12 \cdot \lambda}$ Максимальный угол наклона поверхности такой волны достигает 30°, что представляет высокую опасность для корабля, и особенно, если он поддерживает штормовой ход навстречу волне. Практически всегда на взволнованной поверхности моря присутствуют волны подобной крутизны, о чем свидетельствуют вспененные на гребнях буруны.

И все же в штормовом море практически никогда не реализуются высокие волны более чем с двумя последовательно идущими крутыми гребнями, так как даже на начальных этапах зарождения ветровых волн, они начинают собираться в групповые структуры трехмерных пакетов волн. Ветровое волнение с длинами волн более 10 метров образуется только постепенным накоплением внешней энергии, и потому природа штормовых волн с большими периодами определяется динамическими свойствами их свободного распространения, что также связано с трансформацией плоских волн к трехмерному виду с ярко выраженной групповой структурой.

Для получения профиля групповой структуры трохоидальных волн используется сложение двух волновых колебаний с близкими частотами, что позволяет моделировать групповые структуры в виде волновых биений (рис. 23). Фазовые углы добавочной волны уменьшены с коэффициентом пропорциональности 0.889, амплитуда также снижена до уровня: $h_{доб} = h/1.134^2$, что не позволяет суммарной волновой трохоиде сделать петлю на вершине максимальной волны.

Самая крупная в групповом пакете волна, называемая на море девятым валом, в динамике своего движения всегда проявляется как малоподвижная или стоячая волна. Стоячий девятый вал может иметь удвоенную высоту в сравнении с прогрессивной волной, отчего его угол склона вблизи гребня может достигать 60°. Но все же малая подвижность девятого вала делает его относительно безопасным для судна, штормующего без хода. Если же корабль поддерживает высокую скорость хода в условиях штормового волнения, то желательно, чтобы обводы его корпуса были адаптированы к условиям жестких встреч с крутыми и высокими девятыми валами.

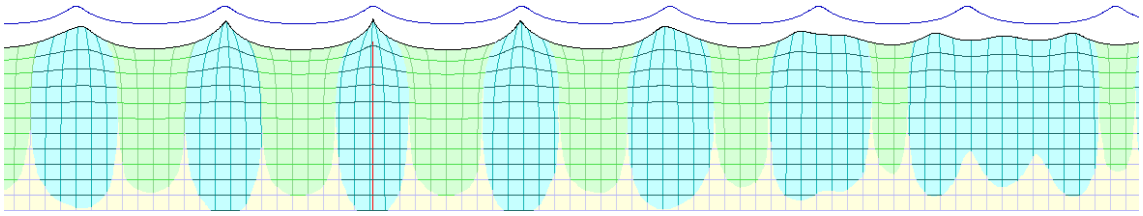


Рис. 23. Модель групповой структуры плоской трохоидальной волны. *Верхняя темная линия показывает форму исходной волны с предельной крутизной: $h \cdot k \approx 0{,}75$ (λ=60м, τ=6,2с, h=7,16м). Девятый вал в групповой структуре также имеет максимально допустимую теоретическую высоту для стоячей волны, при крутизне $h \cdot k \approx 2$. Затененные области отмечают глубину волновых возмущений, превышающих 1% от высоты волны на поверхности*

Групповая структура волн, близкая по форме к плоским волнам (рис. 23), может сложиться только в относительно узких морских проливах или на реках. В открытом море пакеты волн не проявляются в столь строгой последовательности, что заметно облегчает условия штормового плавания.

Таблица 1. Период, длина, фазовая скорость и экстремальная высота обрушающейся ветровой волны

τ сек	λ м	C м/с	H_{max} м	τ сек	λ м	C м/с	H_{max} м	τ сек	λ м	C м/с	H_{max} м
1	*1,6*	*1,6*	*0,2*	6	***56***	***9,4***	***6,7***	11	*189*	*17,2*	*23*
2	*6,2*	*3,1*	*0,7*	7	***77***	***10,9***	***9,2***	12	*225*	*18,7*	*27*
3	*14,1*	*4,7*	*1,7*	8	***100***	***12,5***	***12***	13	*264*	*20,3*	*32*
4	*25*	*6,2*	*3,0*	9	*126*	*14,1*	*15*	14	*351*	*21,9*	*42*
5	*39*	*7,0*	*4,7*	10	*156*	*15,6*	*18*	15	*451*	*23,4*	*54*

В таблице 1 приведены экстремальные оценки для морских волн с периодами от 1 до 15 сек. H_{max} – высота прогрессивной волны с обрушающимся гребнем на глубокой воде, в котором поток воды движется со скоростью, равной фазовой скорости фронта волны C. Важно отметить, что свежие ветровые волны, с ярко выраженной групповой структурой, могут быть существенно выше, чем показанные в таблице 1, но вследствие малой подвижности их девятых валов, они не представляют столь же высокой опасности для малоподвижного или аварийного корабля без хода.

Для морских акваторий характерными являются периоды волн от 6 до 8 сек (*выделено жирным*), что соответствует длине волны порядка 80 м, максимальной скорости потока в гребне волны - 10 м/с (*20 узлов*) и экстремальной амплитуде волны порядка 10 м. В открытом океане период волн может достигать 15 и более секунд, но только для волн зыби, имеющих относительно малую амплитуду, обычно без обрушающихся гребней.

На побережье открытого океана, при прохождении штормов, нередко наблюдаются волны прибойной зыби с периодами порядка 11-13 секунд (*подчеркнуто*), высота которых существенно выше, чем у волн открытого моря. Именно поэтому плавание вблизи побережья или над морскими отмелями всегда представляет повышенную опасность для мореплавателей.

Групповая структура трохоидальных штормовых волн и зыби в открытом море

Поддержание штормовой мореходности корабля возможно при правильном учете гидродинамических свойств трохоидального волнения с обрушающимися гребнями «девятых» валов, непознанная мощь и чрезмерная опасность которых отмечается ныне российскими и зарубежными исследователями. В практическом судовождении традиционно используются модели волнения, которые представляются в виде наложения нескольких независимых систем волн: 1) ветровое волнение совпадает с направлением действия ветра, а высота волн может быть предельно большой; 2) две-три системы волн зыби, являющихся отголосками ранее прошедших или отдаленных штормов, при этом длина волн зыби обычно существенно больше, чем у ветровых, а крутизна – меньше.

В рамках теории Герстнера поле скорости и геометрическая форма гравитационных волн на глубокой воде оценивается параметрическим описанием траекторий частиц жидкости, движущихся в лагранжевых (локальных) координатах по циклоидам с переменным радиусом:

$$x_W(a,x,z) = x - a\cdot\sin(x\cdot 2\pi/\lambda)\cdot e^{2\pi\cdot(z+a\cdot\cos(x\cdot 2\pi/\lambda)-a)/\lambda};$$
$$z_W(a,x,z) = z + a\cdot\cos(x\cdot 2\pi/\lambda)\cdot e^{2\pi\cdot(z+a\cdot\cos(x\cdot 2\pi/\lambda)-a)/\lambda}, \quad (1)$$

где: x_w, z_w – расчетные аппликата и абсцисса частиц жидкости, включившихся в волновое движение с изначальными параметрическими координатами: x, z; a – коэффициент амплитуды (*полувысоты*) волны относительно теоретического максимума: $A = a\cdot 1{,}134\cdot\lambda/(4\pi)$. Область определения аргументов a и x ограничена: $0 < a \le 1{,}0$; $z \le 0$. Если коэффициент амплитуды будет задан отрицательной величиной: $a < 0$, то это изменит фазу волны на 180°, что признано нежелательным для сохранения однородной структуры волнового поля, а при необходимости такого изменения фазы можно добавить к абсциссе половину длины конкретной волны: $\lambda/2$.

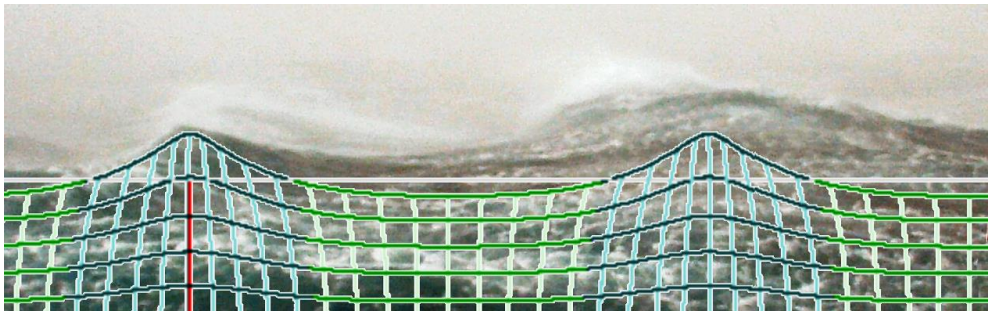


Рис. 24. Характерная форма штормовой прогрессивной волны*. Угол склона вблизи вершины достигает 30°. При длине волны λ=100 м (период 8 сек.), суммарная высота от впадины до вершины составляет 12 м (прилив/отлив – 9/3м), а скорость набегающего потока в гребне превышает 20 узлов*

Прогрессивные волны Герстнера представляют серьезную опасность для неуправляемого судна без хода, так как встречные течения в вершинах и впадинах волн стремятся поставить его корпус лагом, после чего возможен мощный силовой удар по надводному борту и последующее увлечение всего судна в интенсивный вихревой поток обрушающихся гребней штормовых волн.

На глубокой воде трохоидальные волны никогда не ходят поодиночке. После объединения в групповые структуры образуются «девятые» валы – волны-убийцы существенно большей высоты, но менее опасные по силовому гидродинамическому воздействию, т. к. сфор-

мировавшиеся «девятые» валы значительно теряют в скорости свободного движения (рис. 24).

Эмпирическое построение поверхности моря для групповой структуры трохоидальных волн возможно в результате наложения встречной системы регулярных волн с фазовым коэффициентом: $x' = -0{,}889 \cdot x$ и несколько меньшей высотой: $a' = a/1{,}286$.

$$\begin{aligned} x_G &= x_W - a' \cdot \sin(x' \cdot 2\pi / \lambda) \cdot e^{2\pi \cdot (z + a' \cdot \cos(x' \cdot 2\pi / \lambda) - a') / \lambda}; \\ z_G &= z_W + a' \cdot \cos(x' \cdot 2\pi / \lambda) \cdot e^{2\pi \cdot (z + a' \cdot \cos(x' \cdot 2\pi / \lambda) - a') / \lambda}. \end{aligned} \qquad (2)$$

Амплитудные коэффициенты трохоидальных волн эмпирически подобраны так, чтобы при a=1,0 угол склона вблизи вершины регулярной волны *(1)* достигал 30°, а в случае групповой структуры волн (2) угол склона вблизи вершины «девятого вала» превышает 45° (*теоретически до 60°*). Наибольшая вероятность встречи с такими волнами-убийцами характерна для условий плавания вблизи центров штормовых циклонов, где кроме гидродинамических условий зарождения девятых валов происходит прямая суперпозиция встречных штормовых волн, и где отчетливо наблюдается крутизна вплоть до 1/4, что существенно превышает теоретические оценки для прогрессивных волн с отношением высоты к длине порядка 1/7.

«Девятый» вал проявляет себя как стоячая волна, а движущиеся перед ним и вслед за ним крупные прогрессивные волны способны обрушиться на корпус судна мощными высокоскоростными потоками, с жесткими ударами по скулам корпуса, резкой качкой, и опасностью катастрофического подныривания под «девятый вал» с сильным носовым дифферентом на высокой скорости хода, ускоренной в динамике скатывания с гребня в глубокую впадину между волнами.

При математическом построении пространственной картины волнового поля можно использовать профили групповых структур волн, дополнительно закладывая в математическую модель длину волнового фронта тем больше, чем меньше амплитудный коэффициент a, что будет соответствовать наблюдаемому на море вытягиванию и выположиванию фронтов морской зыби.

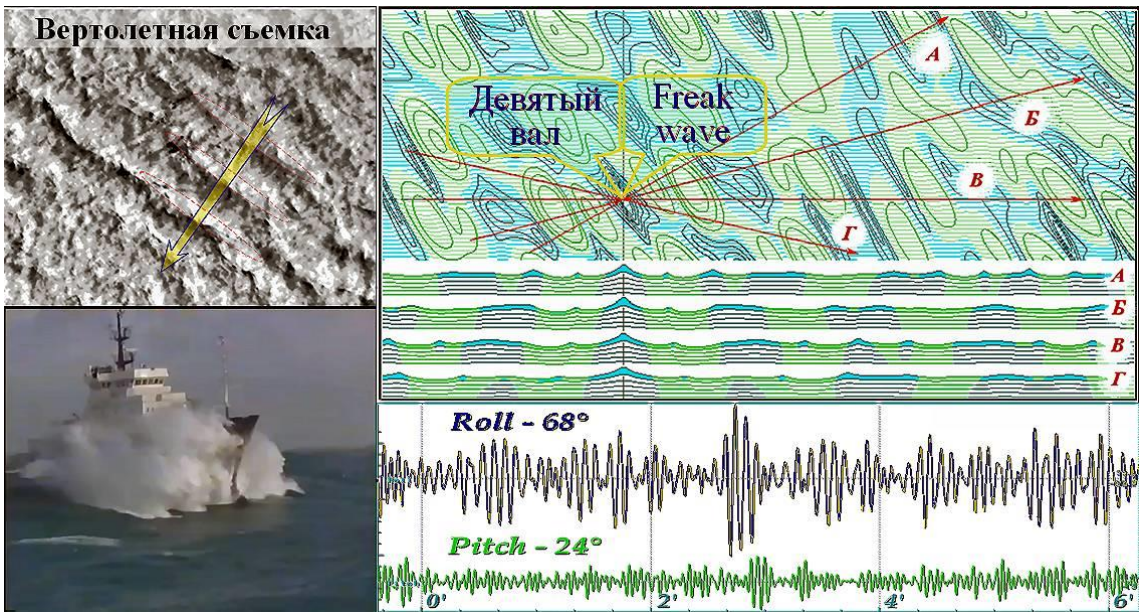


Рис. 25. Волновое поле математической модели *(сверху справа) представляется наложением трех ячеисто-групповых структур трохоидальных волн: ветровых (λ=60м, τ=6,2с, h=7,2м, А=250°); первой и второй систем зыби (λ=100м, τ=8,0с, h=5,9м, А=210° и λ=160м, τ=10,1с, h=5,1м, А=270°), и позволяет построить прогнозные профили волн, с которыми встречается судно на курсах А, Б, В и Г, отличающиеся на 15°. В центре волнового поля показан «девятый вал», от встречи с которым любое судно вполне может уклониться. Справа внизу приведены реальные записи качки судна в штормовом море с размахом по углам крена до 68° и дифферента – 24°. Слева приведены авиасъемки волнового поля (сверху) и один кадр видеофильма о движении спасательного судна в условиях умеренного волнения*

Показанная на рис. 25 математическая модель волнения вполне соответствует наблюдениям за реальным штормовым волнением в открытом море (*фото слева*), когда групповые структуры ветровых волн и волн зыби наиболее активны и следуют ячеистыми порядками с ярко выраженными гребнями «девятых валов». Вертикальной линией в нижней части рис. 1 помечена теоретически максимальная волна, которая может быть названа «волной-убийцей». Но все же реальное морское волнение не является катастрофичным, судоводителю всегда предоставляются большие участки штормового моря, на которых отсутствуют особо крутые волны, и где позволительно активное маневрирование судна, в том числе для активного уклонения от встречи с особо крупными волнами.

На ходу корабля обычно 2-3 «девятых вала» проходят по борту, и лишь после этого происходит прямое столкновение с особо крупной волной (при условии, что рулевой не ведет корабль «по кочкам»). Принимая характерный период штормовых волн Охотского моря равным 8 с., получаем, что для уклонения от жесткой встречи с крупной волной необходима заблаговременность прогноза «девятого вала» порядка 1-1,5 минут, что вполне может быть осуществимо с использованием вычислительных мощностей современных микропроцессоров.

Как на аэрофотоснимке, так и на эмпирическом волновом поле хорошо просматриваются короткие и крутые ветровые волны, а для обнаружения фоновых волн зыби судоводителю обычно приходится подниматься на верхний мостик корабля. При выборе штормового курса и скорости хода обычно учитываются только особенности ветрового волнения, параметры которого оцениваются по картине вспенивающихся гребней волн, наблюдаемых через брызгоотбойники в иллюминаторах ходовой рубки. В ночное время безопасность штормового плавания зависит только от интуиции судоводителя, которому абсолютно ничего не известно о состоянии моря, кроме, пожалуй, оценок силы и направления ветра. Если судно не обладает достаточной штормовой мореходностью, то при таком навигационном обеспечении судовождения, конечно же, не может идти даже речи о возможности эффективного и безопасного плавания произвольным штормовым курсом. Тем не менее, даже в столь «слепых» условиях безопасность плавания немореходного судна может поддерживаться активным штормовым маневрированием на курсе носом на волну или вразрез волне, что в свою очередь сопровождается большими перегрузками рулевых машин и валопроводов гребных винтов.

Оптимизация условий штормового плавания нуждается в надежной автоматической регистрации параметров штормового волнения, работающей в любых погодных условиях и условиях видимости. В современной судоводительской практике изучаются вопросы использования специальных океанографических радаров, способных уверенно регистрировать волновое поле и поле скоростей поверхностных

течений с неподвижной береговой платформы. Интенсивно раскачивающееся судно существенно затрудняет анализ радиолокационных данных, тем не менее, режим отслеживания ближайших к судну штормовых волн мог бы стать неоценимым подспорьем в работе судоводителя, так как радиолокационное картирование волнового поля может использоваться в составе стандартных процедур автоматического управления судном в сложных условиях плавания.

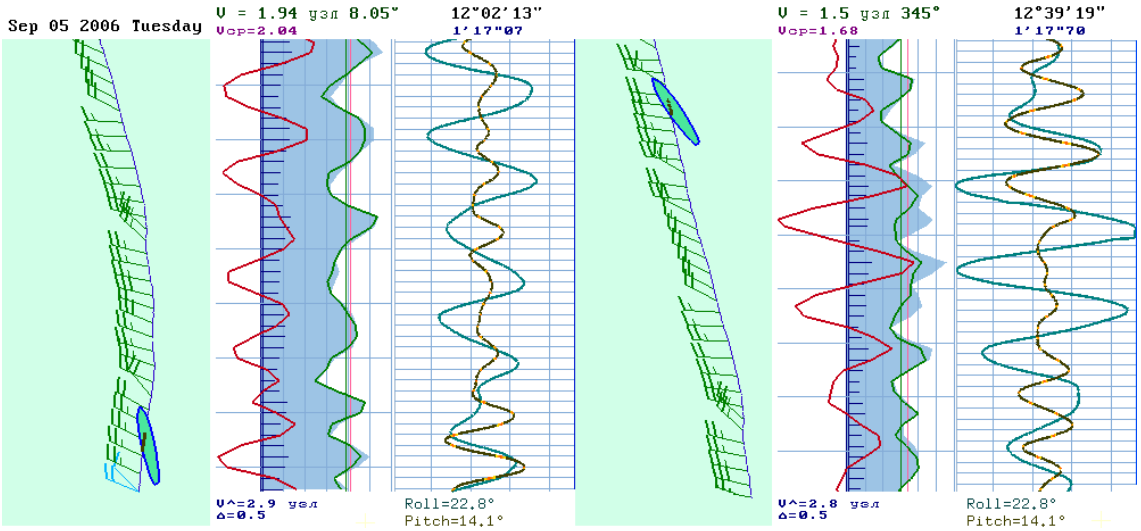


Рис. 26. Два примера регистрации динамики качки и ходкости морского судна *на переходе по сахалинскому шельфу в свежую погоду. На кривых в правой стороне рисунков показано изменение крена и дифферента судна, которое сопоставляется с величиной отклонения от курса (на центральной кривой), измеряемой с помощью приемника GPS. На левом поле приведены маршруты судна, на которых показаны ежеминутные отметки направления и скорости ветра, достигающего 10-12 м/с.*

В качестве простого и надежного регистратора волнения может выступать также сам корпус корабля. По рис. 26 можно отметить синхронность изменения углов килевой и бортовой качки, измеряемой бортовыми инклинометрами, и с помощью оценки пульсаций скорости хода, определяемых по приращению географических координат судна. Параметры собственных вертикальных колебаний, рыскания и качки могут оценены по текущей весовой загрузке корабля и кривым элементов теоретического чертежа судна. В плавании на интенсивном волнении эти параметры должны адаптироваться к большим углам крена и дифферента по реальным записям регистрирующих приборов.

Такое уточнение может быть выполнено с помощью процедуры идентификации параметров дифференциальных уравнений качки корабля.

Быстрая оценка параметров штормовых волн, наиболее активно воздействующих на корпус корабля, может быть сделана по записям килевой качки, которая, ввиду малости периода собственных продольных колебаний корпуса, должна прописывать форму морских волн, соизмеримых с длиной корабля. Для прямого измерения параметров штормовых волн меньшей длины возможно использование океанографических радаров или забортных волнографов.

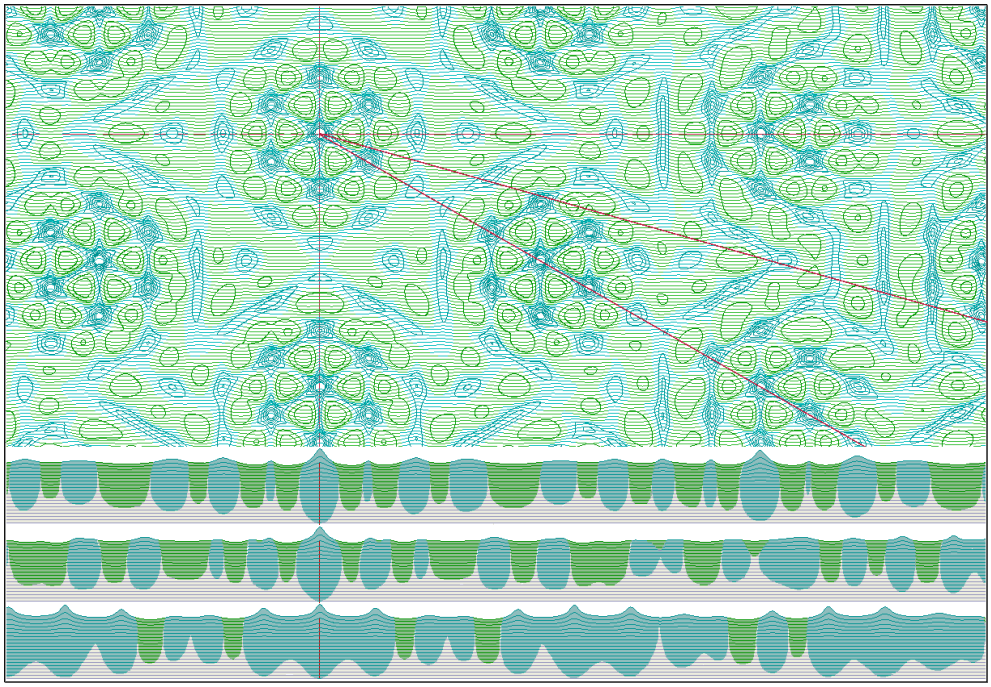


Рис. 27. Поверхность волновых возмущений уровня моря при схождении трех одинаковых волновых структур *(λ=100м, τ=8,0с, h=12м, A=30°, 150° и 270°), называемая на море «толчеей», образующейся в центре циклонов. В нижней части рисунка приведены разрезы по горизонтальной красной линии (верхний график) и по отклоненным на 15° и 30° линиям. Максимальная высота волны в точке схождения волн достигает 33 м.*

Анализируя эмпирическую модель штормового волнения, можно сделать вывод о том, что для восстановления реальной картины волнообразования необходимо провести замеры килевой качки корабля в секторе курсов ± 30°. В штормовом плавании в таком же секторе происходит естественное рыскание корабля на курсе, и потому не пред-

ставляет дополнительных угроз для безопасности штормования. Сектор курсов для маневрирования при уклонении от девятых валов находится в пределах ± 15°, что вполне достижимо по времени реагирования движущегося судна при своевременной перекладке руля. Сектор выбора оптимальных курсов относительно волнения также укладывается в ± 15°, что фактически позволяет держать произвольное интегральное направление движения (*генеральный курс*) с помощью оптимального лавирования между крупных гребней штормовых волн.

Рис. 27 иллюстрирует особый случай волнения на море – «толчеи», наблюдаемой в дифракционной зоне морских мысов или при плавании в центре глубокого циклона. Это случай наиболее интенсивного волнения, при котором крутые стоячие волны возникают совершенно непредсказуемо, а безопасность плавания корабля может быть обеспечена исключительно за счет обводов корпуса, при условии минимизации интенсивности силового взаимодействия корабля и морского волнения.

На вертикальных профилях волн, приведенных в нижней части рисунка, показаны различные курсы судна на одном и том же волнении, от выбора которых зависит интенсивность качки судна. Верхний профиль – обычный курс судна, отсчитывающего девятые валы. Средний профиль – оптимальный курс, на котором килевая качка будет минимальной. Нижний профиль – «плавание по кочкам», при котором условия обитаемости на корабле наихудшие.

Трехмерная эмпирико-аналитическая модель морского волнения удовлетворяет законам гидромеханики волн большой высоты и вполне применима для поисковых исследований в качестве модели внешней среды, как в случае разработки проектных оценок мореходности новых судов, так и для краткосрочных прогнозов силового воздействия волн в автоматических системах штормового маневрирования с целью стабилизации качки и оптимизации ходкости корабля.

Навигационный комплекс контроля состояния моря, атмосферы и мореходности корабля

Дальневосточные моря отличаются высокой штормовой активностью, частыми туманами и тяжелыми ледовыми условиями в зимние навигационные сезоны. Дальневосточные моряки хорошо знакомы с ураганными ветрами над морем, с гигантскими волнами зыби и экстремальными течениями вблизи прибрежных скал. Отсутствие защищенных от штормов заливов и гаваней, малая заселенность побережья и низкая активность каботажного мореходства в этом районе имеют следствием неразвитость навигационно-гидрографического обустройства, отчего море несет большие опасности как для мореплавателей, так и для населения на побережье Дальнего Востока России в целом.

Каждому моряку необходим немалый морской опыт для выполнения рейсовых заданий. Однако современная морская измерительная техника, вычислительные и информационные возможности бортовых компьютеров могли бы предложить капитану обоснованные рекомендации или оптимальные варианты судовождения в столь сложных или экстремальных условиях плавания.

Внедрение в морскую практику автоматизированных систем мониторинга больших по площади морских акваторий и современных навигационных комплексов контроля состояния моря, атмосферы и мореходности корабля, является важным условием повышения эффективности дальневосточных морских коммуникаций в целом и обеспечения безопасности штормового мореплавания на каботажных маршрутах у Сахалина и Курильских островов.

Корабельный вариант метеостанции в комплекте с датчиками регистрации динамики корабля на волнении составляет основу универсальной бортовой аппаратуры для определения состояния моря, атмосферы и динамики их взаимодействия с движущимся кораблем. Характер морского волнения оценивается с помощью бортовых инклинометров и акселерометров, измеряющих параметры бортовой, килевой и вертикальной качки корабля. Автоматически формируемый пакет гидрометеорологических данных, доставляемый по телеметриче-

ским каналам связи в морские службы капитанов порта и в морские отделы управлений гидрометеослужбы, сможет образовать ключевой поток информации для использования в прогнозах опасных морских явлений вблизи побережья, а при необходимости и для выработки рекомендаций судоводителю о наиболее эффективных маршрутах и режимах плавания в открытом море. Эта же информация о динамике судна и состоянии моря, дополненная интегральными оценками условий плавания из береговых служб, может быть востребована судоводителем для решения навигационных задач; в первую очередь для повышения эффективности и безопасности штормовой эксплуатации корабля.

В 2001-2004 гг на борту гидрографических судов ГС-210 и ГС-47, при активном участии сахалинских гидрографов, а в 2006 г. на борту НИС «Профессор Богоров» при поддержке нефтепромысловой компании «Сахалинская энергия», проводились длительные по времени наблюдения за динамикой судна, поверхности моря и атмосферы.

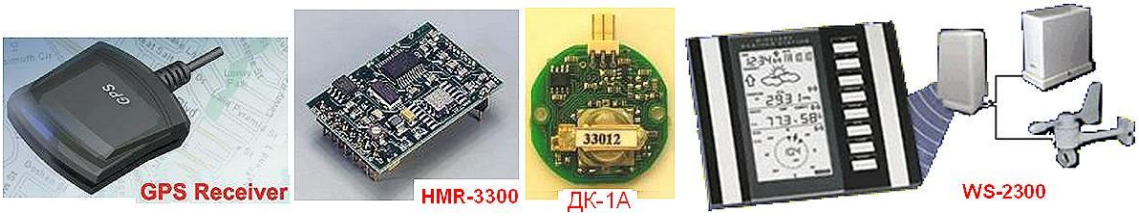


***Рис. 28. Образцы современной измерительной техники**: приемник GPS – исчислитель абсолютных координат судна; магнитный компас и двухкоординатный безынерционный инклинометр HMR-3300; высокоточный гравитационный инклинометр ДК-1А; цифровая метеостанция – WS-2300.*

Бортовой комплекс измерительной аппаратуры был образован современными и вполне общедоступными измерительными датчиками (рис. 28), навигационными и гидрометеорологическими приборами, позволившими сформировать следующие массивы цифровых данных за весь период морской экспедиции:

- Измерение углов крена и дифферента датчиками ДК-1А гравитационного типа с точностью до 0,01° и частотой записи порядка 10-12 отсч/с;

- Измерение углов рыскания и параметров качки с использованием магнитометров типа HMR-3300 в качестве безынерционных компаса и инклинометров, работающих с точностью до 0,1° и частотой записи до 10 отсчетов в секунду[25];
- Изменение относительных координат, скорости и направления движения судна с использованием приемников GPS с точностью до ± 1 м с интервалом 1 с;
- Цифровая метеостанция с цифровым выходом на ЭВМ обеспечивала ежеминутные записи скорости ветра с точностью ±0,1 м/с, его направления ±2 румба; давление атмосферы ±0,1 мб и др.
- Бортовой навигационный или гидрографический эхолот с цифровым выходом, если таковой имелся на судне, обеспечивал регистрацию глубины моря с частотой от 2-3 до 0,5 отсч/с., в зависимости от глубины под килем судна.

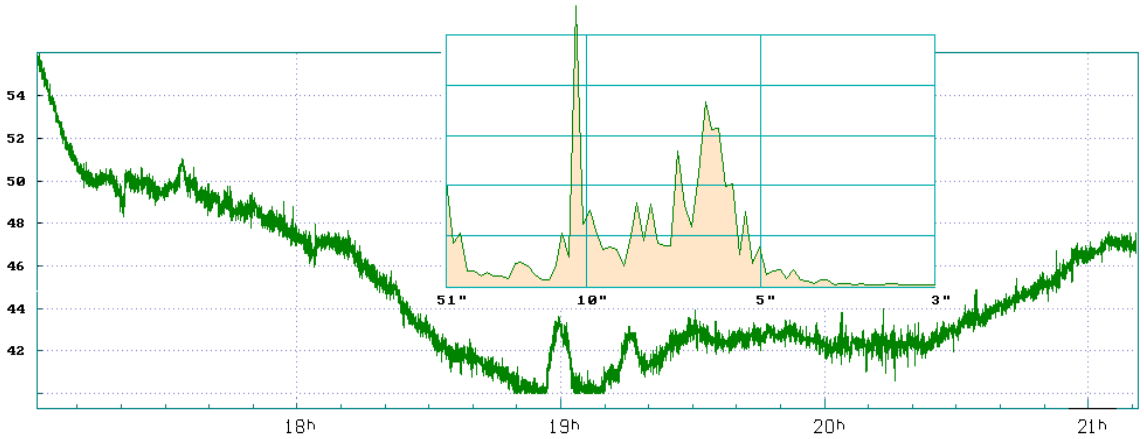


Рис. 29. Пример цифровой записи *отсчетов глубины гидрографического эхолота ELAC LAZ-4700 и сильно сглаженный оценочный спектр этой записи в диапазоне периодов вертикальной качки судна от 3 до 51 сек. На нижней оси эхограммы указано время суток, на левой вертикальной шкале – глубина моря*

Для сопоставления измеренных данных с реальным состоянием моря в необходимо проводить визуальные наблюдения за параметра-

[25] Магнитометр HMR-3300 использовался в море только в экспериментальном режиме, и в описываемых экспедициях не задействовался для сбора больших массивов данных о динамике судна на волнении, так как изначально предполагалось, что он заметно уступает по точности гравитационным инклинометрам типа ДК-1.

ми морского волнения и зыби, отчасти уточняющие сравнения могут быть выполнены с использованием комплектов гидрометеорологических карт с приземным анализом и суточным прогнозом полей ветра и волнения по северо-западной части Тихого океана и Охотскому морю. Комплексный анализ экспедиционных данных ориентирован на решение новых навигационных и гидрофизических задач в интересах создания автоматизированной системы контроля состояния моря и прогноза опасных морских явлений.

Унифицированная автоматическая гидрометеостанция в зависимости от круга решаемых задач может комплектоваться различными функциональными блоками: 1) комплект синоптических датчиков для непрерывной регистрации состояния атмосферы (скорость и направление ветра, давление, температура и влажность воздуха и др); 2) стандартный судовой комплект (считыватели показаний координат, курса и скорости судна, а также дополнительные датчики углов крена, дифферента и вертикальной качки судна, в том числе получаемых с помощью путевого эхолота); 3) система передачи телеметрических данных в одном из вариантов доступа в глобальную сеть (интернет) по системам дальней спутниковой, коротковолновой или прибрежной УКВ-радиосвязи; 4) прибрежный комплект гидрофизических датчиков (регистратор уровня моря, температуры воды, волнения и, при необходимости – скорости течения); 5) автономный шлюпочный комплект, дооснащенный компáсом и приемником Глобальной системы позиционирования (GPS).

Предполагается, что данный комплект измерительного оборудования и специальное математическое обеспечение позволят оперативно решать следующий круг задач:

а) автоматический сбор, обработка и передача оперативной информации о состоянии моря и атмосферы по телеметрическим каналам связи на береговые центры, в соответствии с регламентом работы судовых гидрометеоцентров или гидрометеопостов;

б) применение измерительного комплекса и оборудования связи с береговыми метеоцентрами в качестве автоматизированной эксперт-

ной системы для анализа режимов безаварийного плавания и оптимизации хода судна в условиях штормового волнения;

в) реализация адаптированных к конкретным морским акваториям прямых вычислительных экспериментов с автоматизированной подготовкой начальных и граничных условий, моделирующих в реальном времени процессы взаимодействия атмосферы и океана, в том числе с возможностью прогноза развития опасных морских явлений;

г) анализ волнового режима вблизи морских портов и на удаленных морских акваториях с использованием сети прибрежных гидрофизических станций, сочетаемых с параллельными наблюдениями с борта морских судов, проходящих вблизи контролируемого побережья.

Первые три задачи могут со временем утверждаться Росгидрометом к регламентному использованию на прибрежных и судовых гидрометеостанциях. Последняя задача может эффективно применяться в гидрографических изысканиях при проектировании новых портов, при подготовке к проведению дноуглубительных работ и реконструкции морских портов и гаваней. Для морских научных исследований оптимально было бы применять опытные образцы усовершенствованных гидрометеостанций, что позволит испытать новое оборудование в реальных морских условиях, и создаст условия для более частого использования в научных изысканиях современнейшей техники, в том числе с целью изучения необычных морских явлений.

К примеру, при изучении волнового режима вблизи сахалинского побережья был использован стандартный навигационный приемник GPS (рис. 30), с вынесенной на верхний мостик антенной, позволяет регистрировать бортовую качку как отклонение судна от курса, с высокой точностью замеряет пульсации скорости хода судна, что может служить как для оценки его ходкости на волнении, так и для регистрации динамики поверхностных течений по маршруту движения судна. Результаты таких наблюдений за пульсациями скорости течений приведены на рис. 30.

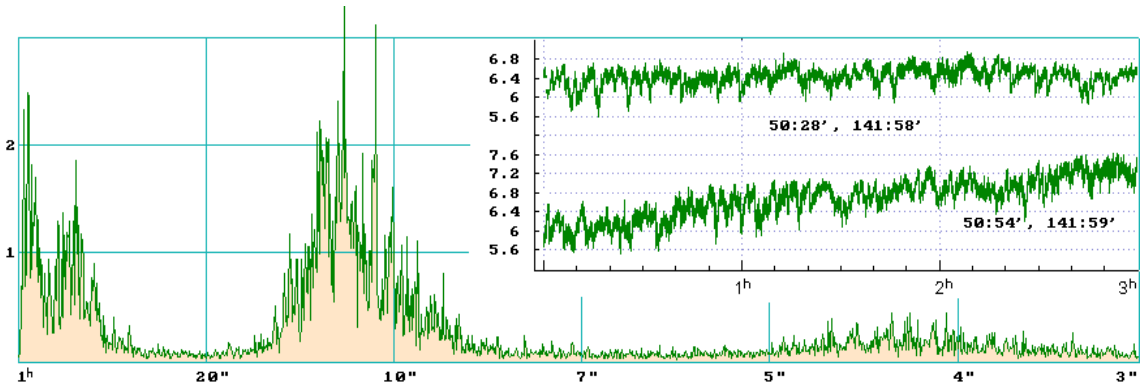


Рис. 30. Спектральная оценка пульсаций абсолютной скорости хода судна по ежесекундным отсчетам приемника GPS и два трехчасовых фрагмента записи этой *скорости (справа вверху). На спектрограмме выделяются пульсации скорости с периодом 4-5 сек, соответствующие килевой качке, а также порядка 10-15 сек – отмечающие наибольшие потери хода при бортовой качке и вызываемые ею рыскания судна на курсе. Изменения скорости с периодами 1 мин и более соответствуют длинноволновым изменениям поверхностных течений в близбереговой зоне, по которой проходил маршрут судна.*

Путевая регистрация и анализ параметров качки и пульсаций скорости хода судна, сопоставление их с нагрузкой на движителях и динамикой перекладок руля необходимы при оптимизации хода судна в условиях умеренного волнения и для поиска решений при выборе безопасных режимов штормового плавания. По мере накопления данных о волновой динамике судов с различными обводами корпуса, они могут быть использованы при поиске оптимальных проектных решений о форме корпуса и общекорабельной архитектуре новых кораблей, что особенно важно для специализированных проектов, в которых функциональные требования к оборудованию или к условиям базирования не могут быть в полной мере согласованы с требованиями безопасности в штормовом плавании.

Характер взаимодействия корпуса корабля и штормового волнения может носить очень жесткий характер, особенно если обводы корпуса оптимизированы для какого-либо определенного режима плавания, к примеру – хорошей всхожести на волну для недопущения заливаемости верхних палуб, а режим реального волнения окажется принципиально отличным от принятого в оптимизационных функционалах. В любом случае, даже неоптимизированный для штормового

плавания корабль может держать штормовой курс, если у штурвала стоит опытный рулевой и вахтенный штурман обладает достаточными знаниями хорошей морской практики. Такие знания могут быть получены судоводителями в случае их непосредственного участия в мореходных испытаниях опытовых телеуправляемых моделей судов, с последующим анализом результатов для разработки рекомендаций мореплавателям.

О МОРСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ПОЛИГОНЕ ДЛЯ ПРОЕКТНЫХ И МОРЕХОДНЫХ ИЗЫСКАНИЙ В ШТОРМОВОМ МОРЕ

Современный уровень вычислительный техники, компактность измерительных средств, доступность и быстрота телеобработки разнородной информации о состоянии и динамике корабля, атмосферы и океана, позволяют вернуться в морском деле к исторически выверенным началам единения теории и практики, возвращая авторитетным мореплавателям возможность непосредственного участия в целевом проектировании нового флота, и помогая корабельным инженерам оценивать маневренные и эксплуатационные качества перспективных судов в сложных и штормовых условиях виртуального океанского плавания.

Эффективная работа каботажных коммуникаций и рыболовства, так же как и возможность освоения ресурсов морского дна, возможны только в случае комплексного решения проблем обустройства морской и прибрежной инфраструктуры, включающей океанский флот, порты убежища и судоремонтную базу, построенные и используемые с учетом реального опыта хорошей морской практики сахалинских мореплавателей и береговых инженеров.

Столь сложные и наукоемкие работы должны поддерживаться авторитетными капитанами-наставниками Службы мореплавания и Морского научно-технического комитета, в свою очередь опирающихся на высокую активность молодых ученых региональной морской научной школы, совместно развивающихся в исторических тра-

дициях общемировой морской практики и международного морского права.

Рассмотрим последовательно блок научно-технических разработок, обобщаемых с целью практического использования в интересах ускоренной активизации морской деятельности на Сахалине и Курильских островах, – в штормовых районах северо-западной части Тихого океана.

Бортовые счетно-решающие комплексы и штурманские базы знаний

Сопряжение береговых систем мониторинга с бортовыми устройствами автоматического управления судном в сложных, штормовых и ледовых условиях плавания, как необходимое следствие развития морской инфраструктуры, представляется важнейшим инструментом обеспечения всепогодного мореходства без избыточных простоев в порту и расточительных штормований «носом на волну» в открытом море. Всепогодность мореходства определяет экономическую эффективность[26] морских коммуникаций и рачительность в освоении морских ресурсов.

В современных судоводительских исследованиях обсуждается использование океанографического радара для регистрации состояния и динамики волнового поля и поля скоростей поверхностных течений с борта интенсивно раскачивающегося судна. Такие измерения в будущем обеспечат достаточность информации для построения моделей гидромеханики в системе автоматического управления судном в условиях интенсивного волнения и ураганного ветра.

Доступным вариантом оперативного прогноза встречи судна с конкретной штормовой волной представляется использование динамически адаптируемых математических моделей штормового волне-

[26] Понятие «эффективность» связано с определением условий безопасности мореплавания, так как любые сомнения всегда сводятся либо к простою, либо к избыточному износу технического ресурса судна по причине чрезмерных штормовых перегрузок, и потому опасного судовождения

ния, обновляющихся по правилам идентификации параметров уравнений с помощью бортовых инерциальных систем и средств радионавигации. Простым и надежным регистратором волнения по ходу судна может служить килевая качка, в том числе измеренная с учетом рыскания судна на штормовом курсе, или по результатам непродолжительного маневрирования в автоматически назначаемом диапазоне скоростей хода и в секторе поиска оптимального направления движения по условиям наилучшей ходкости и/или минимальности качки.

В любом случае, даже неприспособленное для штормового плавания судно не окажется в аварийной ситуации при достаточной мощности главных машин, если у штурвала стоит опытный рулевой и вахтенный штурман обладает достаточными знаниями хорошей морской практики.

Такой практический опыт может быть приобретен судоводителями в случае их непосредственного участия в мореходных испытаниях телеуправляемых моделей судов в сложных и штормовых условиях плавания, с обязательным детальным анализом законов гидромеханики взаимодействия корпуса корабля и штормового моря, с изложением ключевых выводов в виде рекомендаций мореплавателям. Ничто не мешает проводить такой тренинг судоводителей при каждом назначении на новое судно, что очень важно для снятия психологического напряжения на ходовом мостике и уверенного судовождения в сложных, штормовых и ледовых условиях дальневосточных морей России.

Сам факт участия в опытовых испытаниях мореходных качеств судна создает основу осознанных правил хорошей морской практики для судоводителей, и обоснованных в будущем проектных решений по достижению наилучшей штормовой мореходности, всецело зависящих от особенностей формы корпуса, общекорабельной архитектуры и энерговооруженности конкретного судна.

Созданная на Сахалине трехмерная эмпирико-аналитическая модель морского трохоидального волнения удовлетворяет законам гидромеханики волн большой высоты, и вполне применима для поиско-

вых исследований в качестве модели внешней среды, как в случае разработки проектных оценок мореходности новых судов, так и для краткосрочных прогнозов силового воздействия волн в автоматических системах штормового маневрирования, с целью стабилизации качки и оптимизации ходкости корабля.

Сахалинский опытовый полигон для мореходных испытаний судов и штормовых экспериментов в открытом море

Географические условия в южной части о-ва Сахалин, наличие крупных озер и морских причалов (рис.31), ветра и прибрежное волнение в любые сезоны года (табл.2), определяют наилучшие в России условия для проведения мореходных испытаний телеуправляемых моделей перспективных и действующих кораблей и судов.



Рис. 31. Географическая карта южной части о-ва Сахалин *с указанием автомагистралей и морских причалов для спуска на воду опытовых моделей судов*

На базе Сахалинского морского и корабельного полигона естественным образом происходит слияние опыта хорошей морской практики авторитетных мореплавателей, с изначально опробуемыми ими

новыми достижениями в области кораблестроительных наук, что автоматически привносится в теоретические курсы морского и морского инженерного образования.

Среди первоочередных планов Сахалинского морского и корабельного полигона определяются изыскания в интересах создания перспективного дальневосточного флота, включающие экспериментальное освоение методов штормового судовождения флота действующего.

Таблица 2. Ветровой режим по многолетним наблюдениям на побережье в южной части о-ва Сахалин.

Район побережья	*Характеристики прибрежных ветров*
залив Анива	*в среднем – 4,5 м/с,* *более 156 дней в году > 8 м/с*
залив Терпения	*май – 6,1 м/с;* *август – 4,8 м/с;* *декабрь – 6 м/с*
Татарский пролив	*55 дней > 15 м/с;* *262 дня до 8 м/с;* *39 дней – штили*

Приоритетными участниками работ на морском полигоне видятся Сахалинский государственный университет и Холмское и Невельское мореходные училища. Предварительно согласуемые планы работ предусматриваю следующие работы:

– Холмский филиал Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского может выполнять методическое обеспечение мореходных испытаний в соответствии с российскими правилами штурманской службы, одновременно включившись в совершенствование регламентирующих документов по штормовому мореходству, апробируя их в процессе подготовки дальневосточных судоводителей к управлению судном в сложных, ледовых и штормовых условиях плавания;

– Сахалинский государственный университет, как научное учреждение широкого профиля, должен проводить фундаментальные исследования и глубокую проработку технических решений для новых проектов кораблей и судов на основе прямых вычислительных экспериментов в области гидроаэромеханики взаимодействия корабля со штормовым морем, поверяемым на телеуправляемых моделях в открытом море на морском полигоне.

Вариант проектных исследований. По результатам вычислительных и опытовых экспериментов оптимизируется форма корпуса судна для достижения минимального ходового дифферента и минимального волнообразования на всех скоростях хода, включая закритически высокие. Оптимизируется распределение надводных объемов и местоположение надстроек, чтобы удары волн и заливание корпуса не приводили к чрезмерным кренящим и дифферентующим моментам на ходу корабля.

Типовая программа мореходных испытаний моделей судов в открытом море и опытовом бассейне (Комсомольск-на-Амуре):

1. Выполняется поверка правильности проектирования обводов корпуса, которые не должны приводить к образованию корабельных волн с крутыми обрушающимися гребнями; не должен проявляться заметный ходовый дифферент на больших скоростях хода;

2. Выявляются гидродинамические свойства корпуса по ходкости и резонансные особенности килевой и бортовой качки, из которых следует заключение о приемлемости общеархитектурных решений; об оптимальности распределения весовой нагрузки по кораблю для достижения апериодических режимов в наиболее опасных и резонансных условиях качки.

3. Маневренность, ходкость и условия обитаемости в условиях интенсивных волн глубокой воды и прибрежного волнового наката:

– достижение максимальной ходкости при минимальной качке;

– возможность уверенного хода любыми курсами, включая маневрирование на всех ходах в условиях интенсивного волнения;

– если по условиям предназначения испытываемого судна невозможно обеспечить всестороннюю оптимизацию режимов хода с по-

мощью заданной формы корпуса и общекорабельной архитектуры, то в экспериментальных исследованиях должны разрабатываться специальные наставления и алгоритмы для штурманских комплексов автоматического управления судном в сложных и штормовых условиях плавания.

Практическое освоение опыта авторитетных мореплавателей возможно только в условиях широкомасштабных теоретических исследований, натурных и модельных экспериментов в открытом море, включающих фундаментальные исследования нестационарных процессов гидромеханики, привязанных к реальным условиям дальневосточных морей России, где планируется строительство новых стационарных и плавучих морских инженерных сооружений.

Активный ход судна при номинальной нагрузке главных машин в любых погодных условиях невозможно формализовать с помощью интуитивно ясных наставлений для судоводителей. Столь смелые судоводительские решения должны опираться на предварительное тщательное изучение мореходных свойств судна на морском полигоне, с последующим включением результатов исследований в экспертные системы и штурманские счетно-решающие устройства для автоматического выбора оптимального курса и скорости хода судна в сложных и штормовых условиях плавания. Для судов ограниченной мореходности особо важно выявление опасных режимов хода в штормовую погоду, что может предотвратить морские катастрофы в условиях штормования малыми ходами, нередко применяемыми при излишней перестраховке или по неопытности капитанов, не способных использовать судовые машины для собственной безопасности.

Для аварийных режимов плавания при потере хода, на морском полигоне возможно заблаговременное опробование исторического опыта мореплавателей, дающего большой выбор поверенных в морской практике методов пассивного штормования с использованием бизани с гафелем, плавучих якорей, кормовых весел и других штормовых устройств и приспособлений.

Отчасти такие научные программы отработаны ранее, в 80-х годах на кафедре теории корабля Ленинградского кораблестроительного института, и которые с успехом используются ныне в проектировании новых судов в Норвегии: типа «Бурбон-Орка», и кораблей в США: типа «Зумвальт»



Рис. 32. Мореходные испытания корабля 21-века *(DDG-1000, «Зумвальт») в США в открытом море (слева); численное моделирование динамики корабля на крупном волнении (справа); и наблюдение за кораблем на аналогичном штормовом волнении (в центре)*

В США, с использованием аналогичных исследований штормовой мореходности корабля (рис. 32), реализованных в Ленинградском кораблестроительном институте в середине 80-х годов под руководством профессора кафедры теории корабля Александра Николаевича Холодилина, в настоящее время завершены окончательные стадии проектирования корабля повышенной штормовой мореходности класса DD(X), и 15 февраля 2008 г военно-морской флот США сделал заказ двух новых боевых кораблей XXI века. По многочисленным материалам и публикациям в сети интернет, в США выполнена аналогичная теоретическая минимизация волнового сопротивления на больших скоростях хода, отчего на расчетной скорости у корпуса не образуется обрушающихся гребней в расходящихся корабельных волнах; заметно уменьшены поперечные волны за кормой корабля. Испытания проводились в опытовом бассейне и в открытом море, где исследовались ходовые и маневренные качества телеуправляемой модели корабля в условиях интенсивного волнения (www.raytheon.com/products/ddg_1000/).

Заключение о Сахалинской региональной морской научной школе

Практика морских изысканий в интересах эффективности мореходства опирается на опыт хорошей морской практики и математические исследования, на показательные натурные и вычислительные эксперименты, проводимые авторитетными морскими инженерами непосредственно в тех морских акваториях, для которых выполняется проектирование и строительство нового флота в комплексе с обустройством прибрежных акваторий и гаваней морских портов.

В материалах морских исследований отмечается повсеместное использование новейшей измерительной и компактной компьютерной техники, сопрягаемой со средствами широкополосной радиосвязи, в том числе для дистанционного управления и прямой видеорегистрации сложнейших процессов взаимодействия опытовых моделей с интенсивным морским волнением и ветром. Ныне ничто не препятствует реальному единению проектно-инженерных работ с эксплуатационной оптимизацией морской техники, как и всей инфраструктуры для ее обслуживания. Из этого следует необходимость укрепления и повышения научно-технического потенциала региональной морской науки, где собственно и востребуется целевое непротиворечивое проектирование перспективного флота, с последующей подготовкой плавсостава для эффективной эксплуатации новых судов в конкретных региональных условиях мореплавания и ведения морских работ.

Реализация перспективных научных планов обсуждалась в дискуссиях морских форумов «Мореходство и морские науки», где одобрено создание Сахалинского регионального Морского научно-технического комитета, способного к ответственному исполнению планов активизации морской деятельности на Сахалине и Курильских островах с учетом современных требований науки и техники, и в полном согласии с хорошей морской практикой и международного морского права, согласованно поддерживающих интеграцию дальневосточных стран и российских регионов в рачительное освоение национальных морских ресурсов и ресурсов морского дна, и дальних морских коммуникаций в интересах России.

МОРСКОЕ ИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО

Судно при шторме, находясь около берега, может найти укрытие только в удобных естественных или в созданных человеком бухтах, т.е. портах или в так называемых портах-убежищах, ковшах. История изучения и освоения Сахалина довольно подробно изложена в книге адмирала Геннадия Ивановича Невельского «Подвиги русских морских офицеров на крайнем Востоке России 1845-1855», изданной в 1878 году.

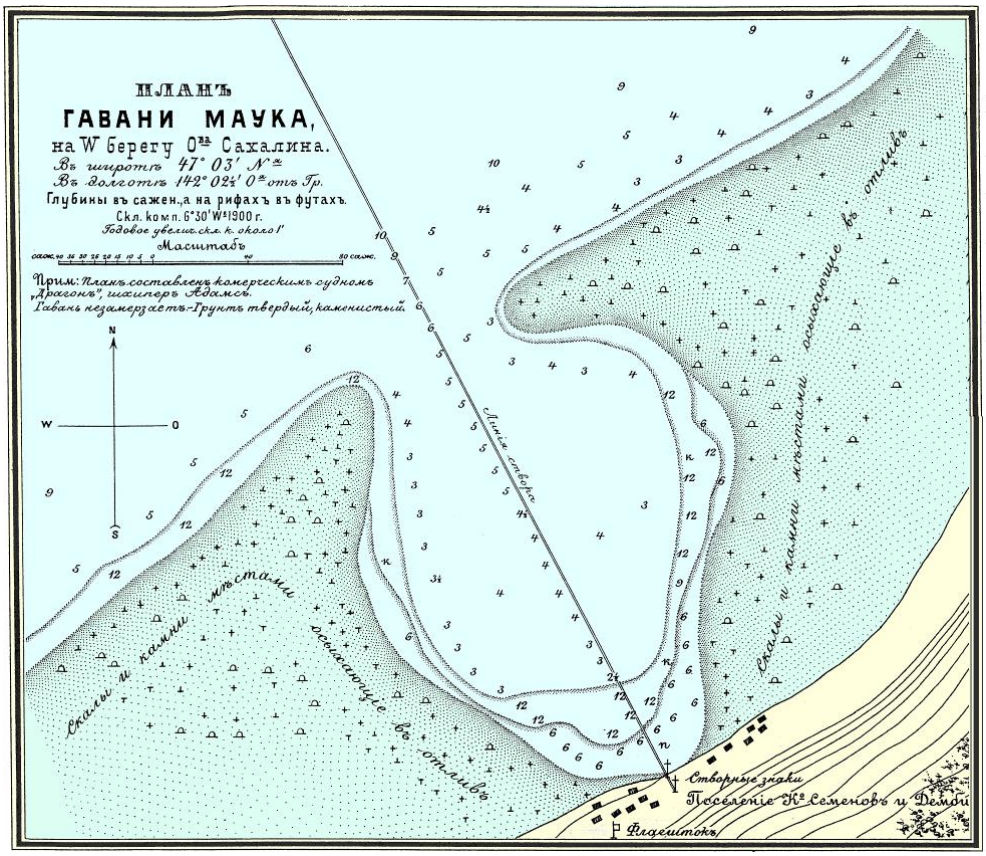


Рис. 33. План гавани Маука (порт Холмск), изданный в 1888 г. *на листе навигационных карт «Временные планы якорных мест на южной половине острова Сахалин и отпечатанной в 1904 году в Главном Гидрографическом Управлении Морского Министерства*

В ходе Амурской экспедиции (1849-1855 гг.) под руководством Г.И. Невельского при обследовании берегов Татарского пролива были описаны основные бухты и заливы в его северной части. Так, например, один из участников экспедиции, Воронин, прибыв с Сахалина, сообщал, что бухты Дуэ и Виахту открыты для южных, северных, се-

веро- и юго-западных ветров, но что стоянку судов в бухте Дуэ можно сделать удобной, стоит лишь воспользоваться рифами, идущими от берега, а именно провести по этим рифам насыпи, которые защищали бы бухту от упомянутых ветров. Бухта Уанды защищена гораздо лучше Дуэ: с северо-запада ее ограждает увалистый мыс Уанды, а с юга – остров и идущий от него к берегу риф. Пользуясь этим, здесь при небольшой затрате труда легко будет сделать для судов прикрытие и хорошую, спокойную стоянку. О заливе Виахту (протоке) Воронин пишет, что сильное течение в протоке – от 3,5 до 5 узлов – и банки, между которыми идет в нее узкий и довольно извилистый фарватер, делают вход в нее затруднительным и опасным. Туземцы же сказали ему, что на всем западном берегу острова Сахалин нет ни одной сколько-нибудь закрытой бухты.

Рудановский Н.В., обследовавший юго-западное побережье Сахалина, а именно залив Невельского от мыса Слепиковского до мыса Лопатина, приводит описание находящихся там бухт. «Главная и самая примечательная особенность этого берега состоит в том, что вдоль него на расстоянии от ¼ до ½ версты[27] идет каменная гряда, возвышающаяся над поверхностью моря от ½ до 2 ½ сажен[28]. Прерванная в нескольких местах, она образует таким образом входы с моря в естественный канал между этой грядой и берегом. Канал имеет 25 бухт, и против каждой из них гряда прорезывается и составляет более или менее широкие проходы с моря, как бы ворота.» По замечанию Рудановского Н.В., канал этот между некоторыми бухтами имеет глубину до сажени, при входе же в бухты, в воротах, она доходит от 2 до 6 сажен, а между некоторыми бухтами глубина канала замечена до 2 футов[29]. Следовательно канал удобен для внутреннего сообщения вдоль всего берега на этом пространстве. Наиболее значительной является бухта Маока (Холмск), в ширину имеет до 2 ½ версты, вдается в берег на 1 ¼ версты и с запада ограждена каменной грядой. В северной,

[27] 1 верста = 1,07 км.
[28] 1 сажень = 1,829 м = 6 футам.
[29] 1 фут = 0,305 м.

наиболее глубокой части бухты глубины колеблются от 3 до 4 сажен. В середине бухты, против входа, глубины 5 сажен (9 м), а в южной части – до 4 сажен; отсюда к южному мысу и юго-западному берегу, на расстоянии от ½ до 1 версты, идет отмель глубинами от 2 до 3 футов. Эта бухта составляла главное пристанище японских джонок на западном берегу острова. По рассказам местного населения, здесь господствуют очень свежие северо-восточные ветры, противоположный им юго-западный ветер нагоняет в бухту воду. Наконец, айны и орочоны сообщили Рудановскому, что на западном берегу, к югу от залива Невельского (Идунок), нет ни одной бухты и почти весь берег скалистый и прямой.

Экспедиционное районирование побережья острова Сахалин

В морских инженерных науках вполне естественно объединение исследований в области корабельной гидродинамики и гидродинамике стационарных морских сооружений, рассматриваемых с единых позиций анализа волновые воздействий при проектировании формы корпуса судна и геометрических характеристик и размерностей портовых гаваней, причалов и волноломов, совместно образующих условия для эффективного обслуживания флота, и для его надежного укрытия от штормовой непогоды открытого моря.

Современный уровень развития информационно-вычислительной техники, систем электронной связи, дистанционных и телеметрических измерений позволяет решать множество традиционных морских задач существенно новыми методами, а неразрешимые проблемы прошлых лет разрешаются совершенными инструментальными средствами обыденно-бытового уровня.

По задачам изучения особенностей мореходства и безопасности мореплавания в морских акваториях Сахалинской области, в экспедиционных условиях проведены длительные по времени записи глубины моря и координат судна с ежесекундной дискретностью.

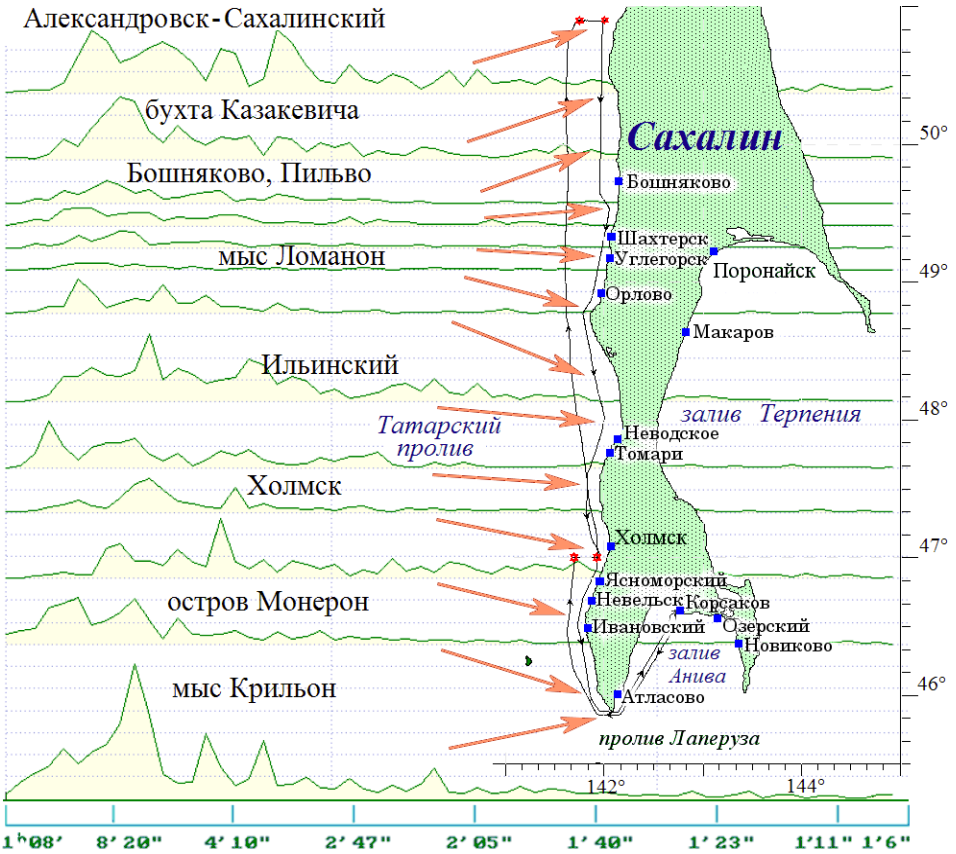


Рис. 34. Распределение спектральной энергии пульсаций скорости хода судна вдоль побережья о-ва Сахалин в Татарском проливе*. Слева от каждого из графиков указаны географические координаты точки, от которой начиналась четырехчасовая ежесекундная запись, использованная при расчете спектрограмм. Данные о длинноволновом режиме вблизи побережья получены за один безостановочный проход экспедиционного судна вдоль побережья с севера на юг. Активные колебания с периодами около 8 минут возникают у мыса Крильон, высокочастотные составляющие которых ослабевают под прикрытием острова Монерон. У мыса Лопатина (Горнозаводск и Невельск) шельф становится уже, и на нем проявляются колебания течений с периодами 1,5–3 минуты, которые ослабевают на подходах к Холмскому порту. В районе обширного шельфа у поселка Ильинский длинноволновые процессы снова активизируются, достигая экстремумов в диапазоне волн с периодами от 4 до 6 минут. Севернее мыса Ломанон активность колебаний заметно угасает, что обусловлено отсутствием морской границы шельфа, а у побережья Александровска-Сахалинского, отличающегося частыми проявлениями морских наводнений, активность пульсаций поверхностных течений значительно возрастает во всем диапазоне периодов длинных волн*

При анализе данных обнаружилось, что в записях мгновенных значений координат, кроме параметров качки и ходкости судна, с до-

статочной достоверностью выделяются пульсации поверхностных течений в длинноволновых диапазонах колебаний уровня моря.

Установленная на верхнем мостике экспедиционного судна «Павел Гордиенко» антенна приемника Глобальной системы позиционирования (GPS) регистрировала параметры ходкости судна, по которым велась оценка влияния морского волнения на потерю хода и устойчивость на курсе. На протяжении всего перехода вдоль западного побережья Сахалина стояла умеренно спокойная погода, условия качки судна не изменялись. С юго-запада, со стороны Татарского пролива, к побережью Сахалина подходила зыбь высотой порядка 0,5–1,0 м и длиной волны от 20 до 40 м, что создавало условия для генерации шельфовых волн на прибрежном мелководье.

Спектральная обработка получаемых от приемника GPS материалов показывала вполне устойчивые оценки динамики длинноволновых процессов на маршруте движения судна (рис. 34). С целью уточнения получаемых материалов, по согласованию с капитаном Е.А. Склизковым, на обратном пути «Павел Гордиенко» пошел на юг от Александровска-Сахалинского по 20-метровой изобате со средней скоростью порядка 6-7 узлов. Оценки интенсивности и периодов длинноволновых пульсаций поверхностных течений регулярно сравнивались с аналогичными оценками, получаемыми в результате проведения на борту судна соответствующих вычислительных экспериментов для выявления характерных аккордов собственных колебаний уровня моря.

Опыт численного моделирования и непосредственного сопоставления результатов с реальными наблюдениями за динамикой моря по маршруту научного судна, позволил определить основные механизмы воздействия морских наводнений и экстремальных течений на конкретные участки побережья и гавани морских портов, аналитическое обобщение которых и стало целью настоящего исследования.

Экспедиционные наблюдения в целом подтверждают корректность численного моделирования длинноволновой динамики в прибрежных водах острова Сахалин.

Гидродинамические особенности проявления длинноволновой динамики моря вблизи побережья.

В основе анализа особенностей проявления волн цунами и морских наводнений у конкретных участков морского побережья может быть использовано разделение процессов воздействия длинных волн на побережье по этапам прохождения первых волн цунами и последующего возбуждения шельфовых акваторий, зависящих от геометрических особенностей прибрежного рельефа морского дна, рис. 35:

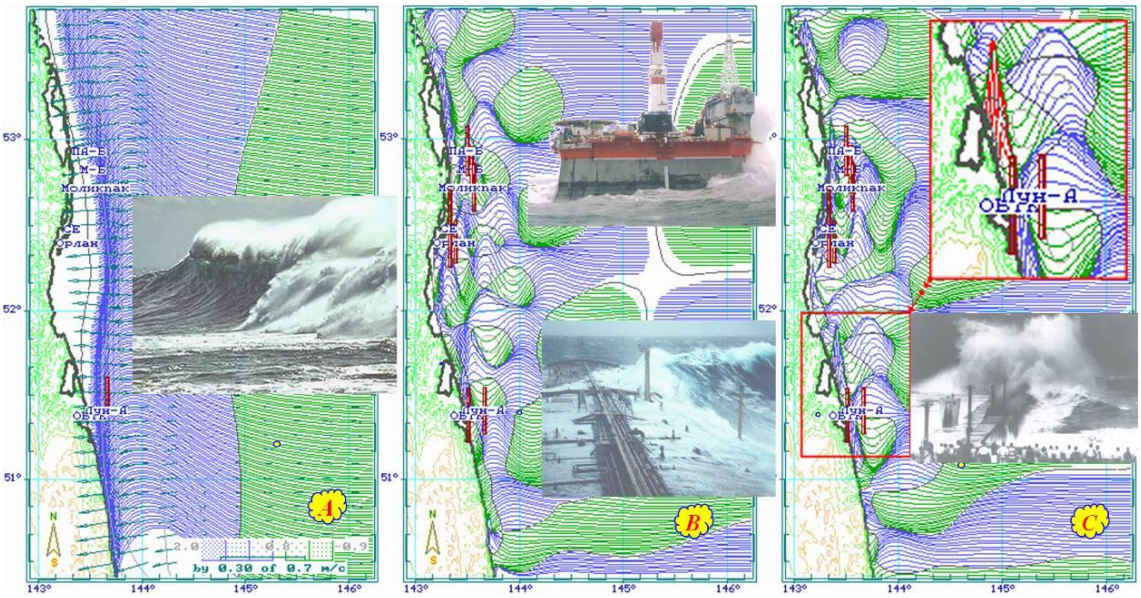


Рис. 35. Восточный шельф Сахалина. Три типовых варианта трансформации длинных волн вблизи морского побережья.
А – обрушение фронта первого вступления волны вблизи побережья, характерное для цунами; В – установившиеся колебания уровня моря под воздействием штормов или морской зыби, идущей из удаленных морских акваторий; С – обрушение длиннопериодной морской волны на побережье, вблизи которого отсутствуют или временно нарушаются условия для полдержания стационарности длинноволновых процессов на изобатах от 25 до 40 м.

А – Прогрессивная, быстродвижущаяся к берегу волна (цунами) обрушивается на все побережье крутым фронтом. Отмели немного задерживают подход волны, одновременно фокусируя удар переднего фронта на небольшом участке берегового уреза, где высота и опасность первого проявления морского наводнения становится наиболее опасным.

B – При длительном длинноволновом воздействии извне, волновая поверхность систематизируется так, что более длинные и потому более высокие волны наблюдаются в основном на изобате от 15 до 30 м, а вблизи берегового уреза собираются пространственно короткие волны малой высоты, как бы защищая берег от заплесков и размыва.

C – Однако некоторые участки побережья не всегда поддерживают стационарность общего длинноволнового процесса на шельфе, и словно по волноводам вытягивают волновую энергию на себя, заливая берег штормовыми наводнениями.

Характер воздействия на морское побережье длинных волн морских наводнений заметно отличается от постоянно существующих длинноволновых процессов в прибрежных мелководьях открытого моря, зарождающихся под воздействием метеорологических факторов и вынужденных волновых колебаний, привносимых из удаленных штормовых акваторий.

В результате серии вычислительных экспериментов по моделированию длинноволновых процессов вблизи побережья выявлено, что при прохождении пакета волн цунами со стороны открытого моря, на маршруте по шельфовым акваториям от границы океанического свала глубин, волны увеличивает свою высоту в среднем в 4-6 раз, в то время как постояннодействующая длиннопериодная зыбь усиливается на этом же участке шельфовой акватории не менее чем в 20-30 раз.

Есть две причины относительно слабого проявления длинноволновой зыби у мелководного побережья, принципиально отличающие характер ее гидродинамического воздействия от аналогичного воздействия импульсного пакета волн цунами (метеоцунами):

1. В прибрежной и шельфовой зоне, на глубинах до 50 м, длинные волны штормового происхождения с периодами более 10 мин становятся захваченными. На морской границе этой зоны захваченные волны ослабевают с 2-3 м до высоты порядка 4-6 см, и в таком состоянии способны отрываться от прибрежных пакетов захваченных волн. Достигая без особых потерь удаленных берегов Японского или Охотского моря, длительное воздействие таких волн с коэффициентом

усиления 20-30, способно проявляться морскими наводнения (метео-цунами) задолго до или после прохождения штормовых атмосферных фронтов. Короткие пакеты волн цунами воздействуют на побережье только в процессе трансформации их фронта первого вступления с коэффициентом усиления порядка 4-6, однако их высота в открытом океане ничем не ограничена, и может достигать нескольких метров;

2. Постояннодействующая длиннопериодная зыбь проявляется вблизи побережья в виде стоячих волн, получающих энергетическую подкачку в виде дискретного аккорда периодов волн, генерируемых либо в результате равномерно распределенного по акватории штормового воздействия, либо приходящих из удаленных штормовых акваторий. Установившиеся колебания вблизи мелководного побережья характеризуются равномерным пространственным распределением волновой энергии, что соответствует выравниванию крутизны волновых фронтов. Так как геометрические размеры длинных волн тем больше, чем глубже акватория, то это объясняет факт исчезающе слабого проявления захваченных колебаний уровня моря на береговом урезе, где традиционно ведутся мореографные наблюдения.

Из второго вывода следует, что установившиеся колебания длинных захваченных волн имеют максимальную высоту волн на глубинах порядка 15-25 м, где нередко располагаются рейдовые якорные стоянки и строятся стационарные морские инженерные сооружения,

Самый первый фронт волны цунами подходит к берегу с постоянным увеличением высоты, вплоть до обрушения гребня волны. Последующие за первым фронтом волны могут попасть в резонанс с собственными длинноволновыми колебаниями на мелководье или внутри заливов. В этом случае цунами сначала задержится на резонирующем участке, а затем обрушится на берег, увеличившись сопоставимо с динамикой длиннопериодной зыби, то есть до 15-20 крат. Такой берег должен быть признан чрезвычайно опасным, так как любое сейсмическое или метео-цунами будет вызывать катастрофически большие наводнения, многократно превышающие средние заплески по окружающему побережью (*бухты Русская и Моржовая на Камчатке*).

Если прибрежная акватория характеризуется монотонным наклоном морского дна, без каких – либо горизонтальных поверхностей и закрытых заливов, то это является условием отсутствия собственных длинноволновых колебаний для такого побережья. Однако, именно такие участки морского дна могут стать своеобразным проводником длинных волн с большой высотой непосредственно до побережья, так как такой нерезонирующий «волновод» способен откачивать на себя длинноволновую энергию из близлежащих акваторий, и рассеивать ее в виде волн большой амплитуды на побережье (*Большерецк на Камчатке, Ыйский залив, побережье к востоку от мыса Юноны в заливе Анива*).

Катастрофические последствия на побережье могут проявляться при нарушении стационарности длиннопериодной зыби, что может произойти, например, при быстром изменении штормовых условий при перемещения циклона из открытого моря на побережье, или в результате изменения приливного уровня моря. Нестационарные морские наводнения могут повторяться через определенное время, что в пространстве наблюдается как своеобразное перемещение вдоль побережья длинноволнового пакета, последовательно вызывающего наводнения во всех пунктах вдоль побережья (*Южно-Курильский пролив, порт Корсаков*).

Оценка собственных длинноволновых колебаний уровня

Интенсивность длинноволновых процессов на морском шельфе и вызываемые ими морские наводнения на побережье в существенной степени зависят от гидродинамических условий поддержания стабильности собственных длинноволновых колебаний уровня, зависящих от геометрических свойств рельефа морского дна на подходах с моря к этому побережью.

Собственные колебания прибрежных акваторий сложно выявить аналитическими или экспериментальными методами, но они довольно точно моделируются прямыми вычислительными экспериментами с длинноволновыми уравнениями в полных потоках. При постановке

вычислительной задачи на выявление аккордов собственных частот учитываются следующие особенности проявления длинноволновых процессов над геометрически сложным рельефом морского дна:

1. Если на морскую акваторию непрерывно воздействует внешнее длинноволновое возмущение на строго определенной частоте, то во всей акватории установятся вынужденные колебания, при этом амплитуда и фаза волн в конкретных точках будет зависеть от пространственной геометрии и резонирующих свойств, близлежащих к этой точке участков морского дна.

2. Если на замкнутую акваторию воздействует короткий единичный импульс, то в ней возникают свободные колебания. Вследствие ярко выраженных дисперсионных свойств волнения моря, обусловленного сильными конвективными течениями в областях со сложной геометрией дна, в исследуемой акватории образуются длинноволновые колебания во всем диапазоне более низких частот, чем содержалось в исходном импульсном источнике.

3. В реальной морской акватории всегда присутствуют области с хорошими резонирующими свойствами для собственных стоячих волн. По прошествии некоторого времени, внешняя импульсная волна сохранится только в таких резонаторах, что проявится на всей акватории характерными аккордами дискретных периодов волн, определяемых топологическими и резонансными свойствами морского дна.

Если пространственные экстремумы для собственных колебаний уровня моря находятся непосредственно вблизи побережья, то такой берег должен быть признан небезопасный для строительства прибрежных инженерных сооружений. Если же на берег будет выходить узловая линия между пучностями крупных стоячих волн, то у такого участка побережья может быть небезопасным строительство выносных морских причалов или организация якорных стоянок даже в случае защищенности этих акваторий от прямого воздействия морской зыби и штормовых ветров.

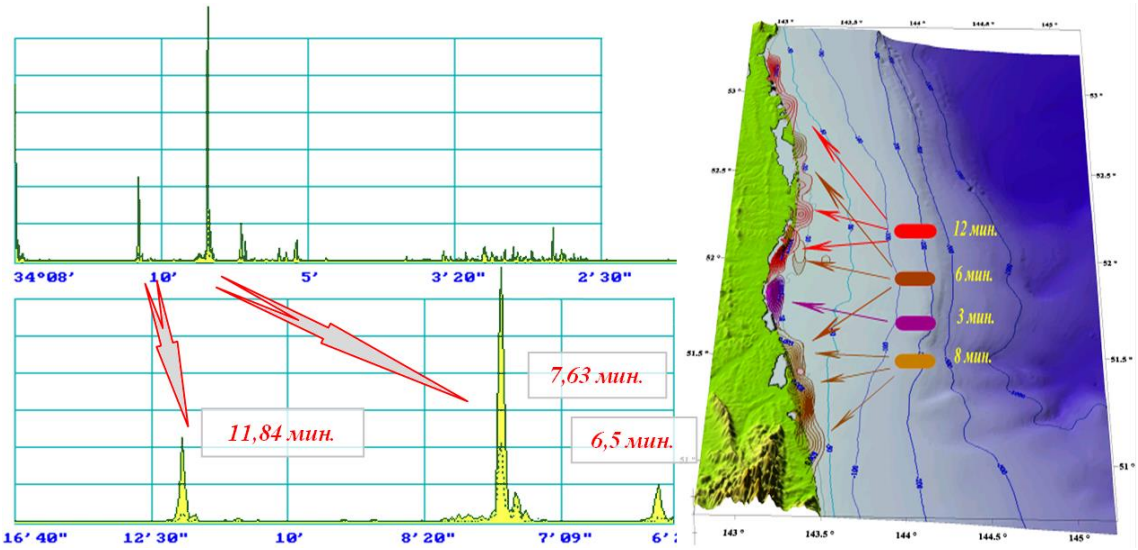


***Рис. 36. Сахалинский шельф**. Характерные периоды (слева) и пространственная привязка резонаторов длинных волн (справа), способных длительное время сохраняться или аккумулироваться на северо-восточном шельфе о-ва Сахалин*

Для оценки потенциальной опасности развития интенсивных собственных колебаний уровня моря и экстремальных течений в Анивском заливе (рис. 37) и на северо-восточном шельфе острова Сахалин (рис. 36), были проведены длительные вычислительные эксперименты для поиска прибрежных и шельфовых длинноволновых резонаторов, проявляющихся в результате воздействия на морскую акваторию единичного длинноволнового импульса с минимально возможным периодом исходной волны.

Выявленные аккорды собственных длинноволновых колебаний отражаются во всех точках регистрации уровня моря, равномерно распределенных по всей расчетной области. Картирование величины интенсивности энергетических спектров для обнаруженных волн показывает их точную привязку к конкретным локальным участкам морской акватории.

Вблизи этих же участков следует ожидать наиболее активного сгонно-нагонного отклика уровня моря и существенного усиления течений при проявлении любых метеорологических или сейсмических воздействий, в том числе происходящих на большом удалении от острова Сахалин.

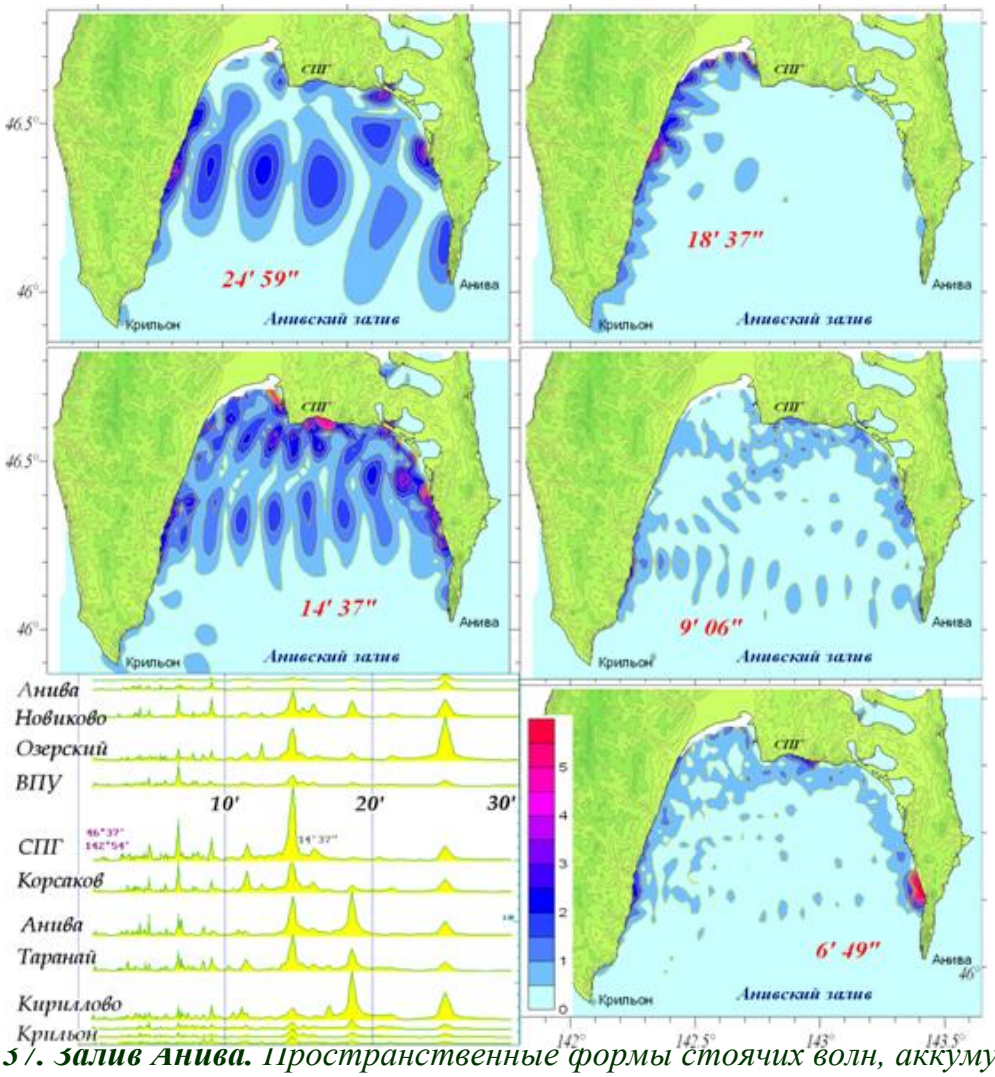


Рис. 37. Залив Анива. *Пространственные формы стоячих волн, аккумулирующих длинноволновую энергию на акватории Анивского залива при прохождении штормов, в том числе за счет длинноволновой зыби из удаленных акваторий Охотского моря и Курильских островов. В результате моделирования остаточных длинноволновых колебаний уровня моря, волны с периодами 25, 18,6 14,6, 9,1 и 6,8 мин на спектральных кривых образовали ярко выраженные энергетические полосы по всему заливу*

Залив Анива является полузамкнутой морской акваторией. Каждый участок побережья залива способен аккумулировать сложные аккорды собственных длинноволновых колебаний уровня моря.

Вычислительные эксперименты, выполненные с использованием подробной батиметрической карты залива Анива (рис. 37) позволили сделать выводы о том, что в целом залив пассивен к длинноволновому воздействию с периодом волн менее 30 мин, и морские наводнения могут возникнуть только при длительном воздействии внешних

штормовых источников, либо в случае невероятно мощного цунами. Образующиеся при этом собственные длинноволновые колебания уровня моря в заливе Анива способны перемещаться вдоль побережья в качестве захваченных волн с периодом 6 и более минут. Собственные колебания акваторий, примыкающих к его западному побережью (*Кириллово, Анива и возможно бухта Лососей*) соответствуют периодам волн 14.5 и 18.5 мин. Акватории, примыкающие к восточному побережью залива, поддерживают колебания порядка 7-9 мин. Вся акватория залива Анива может поддерживать и усиливать колебания с периодом 14.5 и 25 мин.

Современные вычислительные эксперименты в длинноволновой гидродинамике могут быть эффективно использованы для оценки динамики уровня моря и течений на акваториях портов и морских рейдах, в том числе при проектировании новых гидротехнических сооружений или для поиска безопасных мест штормового укрытия судов в прибрежных бухтах и морских заливах.

Гидродинамические особенности Холмского морского торгового порта

Порт Холмск является искусственным гидротехническим сооружением, построенным на месте гавани Маука. Географически он расположен в вершине глубоководного япономорского желоба, и его внутренняя акватория с минимальными искажениями откликается на длинноволновые процессы в Японском море с периодами волн более 3 мин. Высокоточная регистрация уровня моря в порту представляет безусловный интерес для оперативной оценки безопасности плавания и прогноза морских наводнений как в порту Холмск, так и на всем сахалинском побережье Японского моря.

В проектировании волнозащитных молов Холмского порта реализован механизм интенсивного гашения ветровых волн и волн зыби, которые разрушаются узкими дамбами – волноломами, обеспечивающими эффективное гашение морского волнения во входных воротах порта *(рефракция штормовых волн и волн зыби на подходе к порту*

создает условия для их активной интерференции во входных воротах с отраженными волнами, имеющими обратный сдвиг фаз, и последующем гашением в волновых ловушках остаточных дифрагирующих на акватории порта штормовых волн). Эти же узкие дамбы (рис.38) являются прозрачными для длинноволновых колебаний уровня моря, что обеспечивает открытость порта для излучения собственных или стоячих волн, аккумулирующихся на мелководьях внутренней гавани.

Входные ворота порта имеют ширину около 120 м, что составляет 12 сек времени прохождения длинноволнового импульса между оголовками волнозащитных молов, рассчитанных по закону:

$$C = \sqrt{g \cdot D},$$

где: C [м/с] – *скорость продольной волны*, g = 9.8106 м/с^2, D = 10 м – *осредненная глубина* на входе в порт.

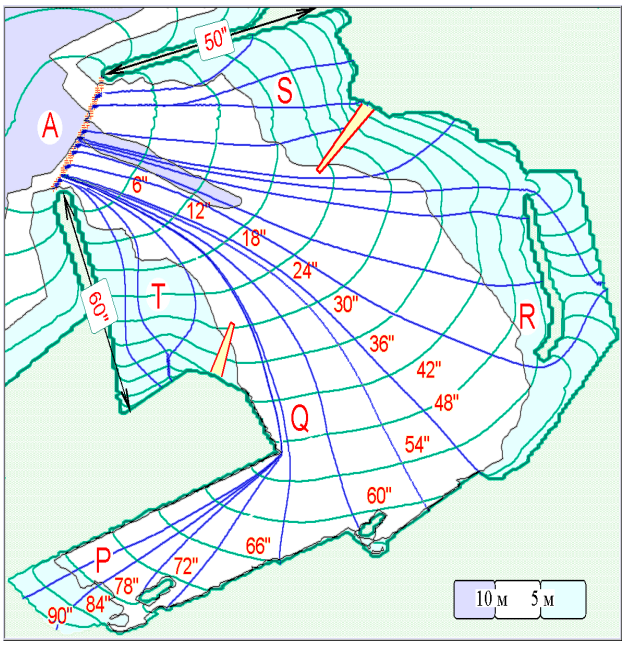


Рис. 38. Батиметрическая карта и кинематическая схема длинноволновых процессов *на акватории Холмского морского порта с указанием расчетных подобластей: **A** – входные ворота порта, **T** – входной фарватер и южная ловушка ветровых волн, **S** – северная ловушка, **Q** – область дноуглубительных работ в районе восьмого причала, **R** – район внутренней восточной гавани, **P** – южная гавань порта. Волна, прошедшая через ворота порта, практически полностью возвращается примерно через 2 мин*

В Татарском проливе действуют ветровые волны и волны морской зыби глубокой воды. Предельные деформации трохоидальных волн и последующее опрокидывание гребней, типичное для прибойной зоны, начинаются в среднем с глубины D = 1.3 η_{max}, где: η_{max} – высота гребня волны. Штормовая волна во входных воротах с глубиной 10 м может достигать высоты 6-7 м, и при такой высоте проявляться в неустойчивом состоянии, близком к опрокидыванию гребня.

По наблюдениям за волнением на акватории Холмского морского порта, в штормовую погоду отмечаются волны с длиной не менее 50-60 м. Скорость таких волн зависит от глубины моря и выражается формулой:

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} th \frac{2\pi}{\lambda} H} \quad ,$$

и составляет 8,2 м/с с видимым периодом 6,1 сек.

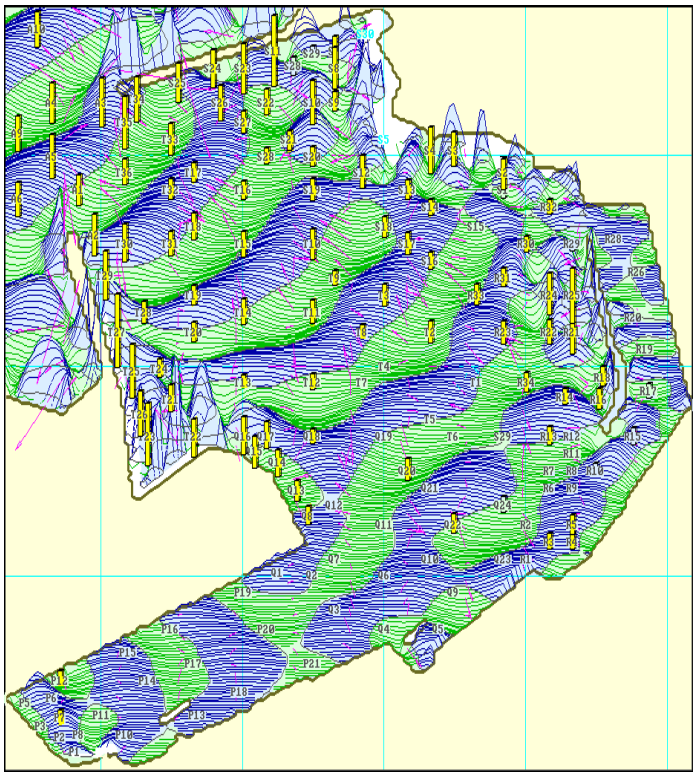


***Рис. 39. Поле штормовых волн** с характерным периодом 10 сек северо-западного направления. Столбиками отмечены экстремальные уровни на текущий момент времени проведения вычислительного эксперимента*

В соответствии с хорошо обоснованным проектом японских гидротехников, порт защищен от штормовых волн и волн зыби открытого моря, которые в прибойной зоне проявляются с периодами 10-12 сек, что соответствует удвоенному периоду наиболее характерных штормовых волн Японского моря. Основная энергия штормовых волн гасится на мелководных пляжах на подходах к Холмскому порту, а отражаемые от волнозащитных молов волны отводятся в разные стороны, чтобы во входных воротах не образовывалось интенсивной толчеи.

Входные ворота практически полностью блокируют прохождение штормовых волн с указанными периодами на операционную акваторию порта, что проявляется довольно любопытным фактом: у причалов возникает интенсивное волнение с половинными периодами, не превышающими 5-6 сек. Обычно в волновой гидродинамике удвоение частоты вынужденных колебаний связывается с существенно нелинейными процессами на маршруте распространения волн, что и было

использовано для исключения свободного проникновения штормовых волн через входные ворота порта. Как выяснилось, наблюдаемые волны малых периодов являются искусственными, так как рождаются на акватории порта и поддерживаются высокой резонирующей способностью отдельных участков его морского дна.

Таким образом, акватория Холмского порта хорошо защищена от штормовых волн и волн зыби, и имеет открытых выход для излучения в открытое море внутренней длинноволновой энергии.

В настоящее время отмечается существенное ухудшение волнового режима на акватории морского порта, что произошло в результате последней реконструкции, связанной с вводом в эксплуатацию второй очереди паромной переправы. При этой реконструкции были разрушены внутренние молы у волновых ловушек S и T (рис. 38), а также сильно укорочен и оборван на мелководном участке восточный мол (зона R), который ранее образовывал особо защищенную внутреннюю гавань для маломерных судов.

Наблюдения за развитием штормового волнения на подходах к Холмскому порту выявили отражение волн от насыпного искусственного берега, расширившего за счет моря южную часть наземной территории порта. Отраженные штормовые волны теперь не гасятся на пологом пляже, а возвращаются к воротам порта и устраивают на его входе интенсивную толчею, блокируя возможность укрытия в порту для малых судов, застигнутых непогодой в открытом море.

Ухудшение волнового режима в целом стало столь заметным, что Холмский морской торговый порт был выведен из состава сахалинских портов-убежищ.

Современные численные методы гидромеханики позволяют провести серию вычислительных экспериментов по моделированию волнового режима порта, которые дают достаточно обоснованные выводы об особенностях существующей геометрии портовой акватории и о различных проектных решениях по ее изменению для восстановления безопасности плавания и укрытия судов в порту Холмск.

Численное моделирование резонансных колебаний уровня моря на акватории Холмского порта

Расчеты волнового режима на акватории Холмского морского торгового порта выполнены с использованием цифровой модели батиметрии порта с шагом оцифровки 3 м. Пространственная аппроксимация позволяла с помощью 3 условных ячеек вести волну с периодом 3 сек по глубине 1 м.

В южной и северной волновых ловушках (рис. 39) происходит увеличение высот и смещение фаз входящих в порт волн. На входе эти волны частично сохраняют свои трохоидальные свойства и при попадании на мелководные пляжи волновых ловушек практически полностью самоуничтожаются. Если часть волновой энергии трохоидальных волн преобразуется в длинноволновую, то на выходе из волновых ловушек она гасится во взаимодействии с новыми, входящими на акваторию порта ветровыми волнами.

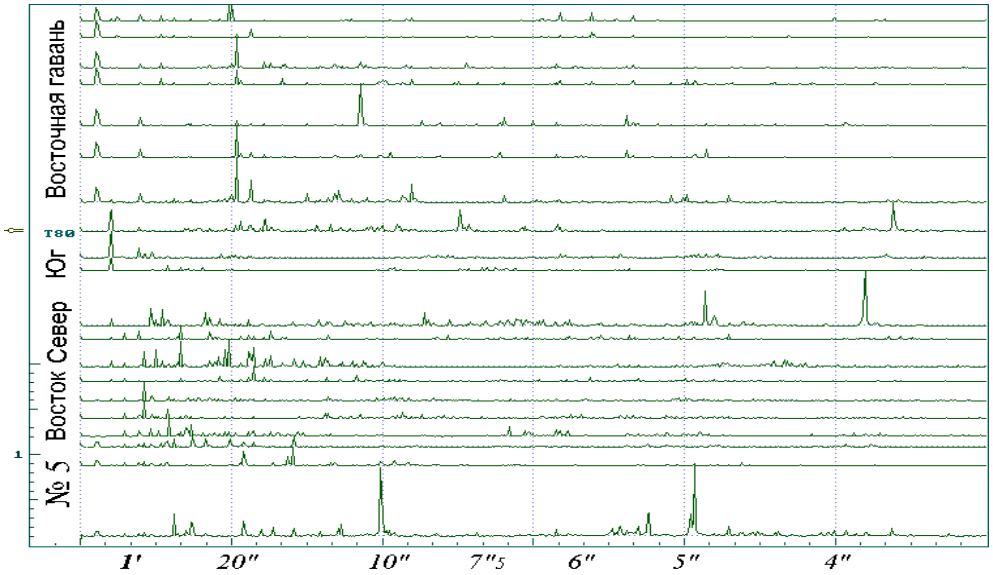


Рис. 40. Аккорды полосовых спектров собственных колебаний в различных точках Холмского порта. *3 нижних спектрограммы относятся к волнению у причала № 5, находящегося в самой удаленной южной гавани порта; выше – спектрограммы для восточного берега порта с внешней стороны от внутренней гавани; затем – в северной части порта и южной волновой ловушке. Сверху приведены спектрограммы, относящиеся к внутренней восточной гавани. На горизонтальной шкале – периоды волн.*

На акватории порта зарождаются различные длинноволновые колебания в диапазоне периодов от 3 сек до 1,5 мин (рис. 40), которые в анализируемом интервале времени проявляются в форме ярко выраженных полосовых спектров.

Для анализа результатов вычислительных экспериментов строились пространственные поля, характеризующие распределение параметров волнения по акватории Холмского морского торгового порта: 1) поле передаточной функции, которая характеризует изменение амплитуды волны относительно опорной точки, расположенной в открытом море на входе в порт; 2) пространственное распределение спектральной плотности энергии длинноволновых колебаний уровня моря на акватории порта; 3) пространственное распределение фазы волны относительно опорной точки во входных воротах порта.

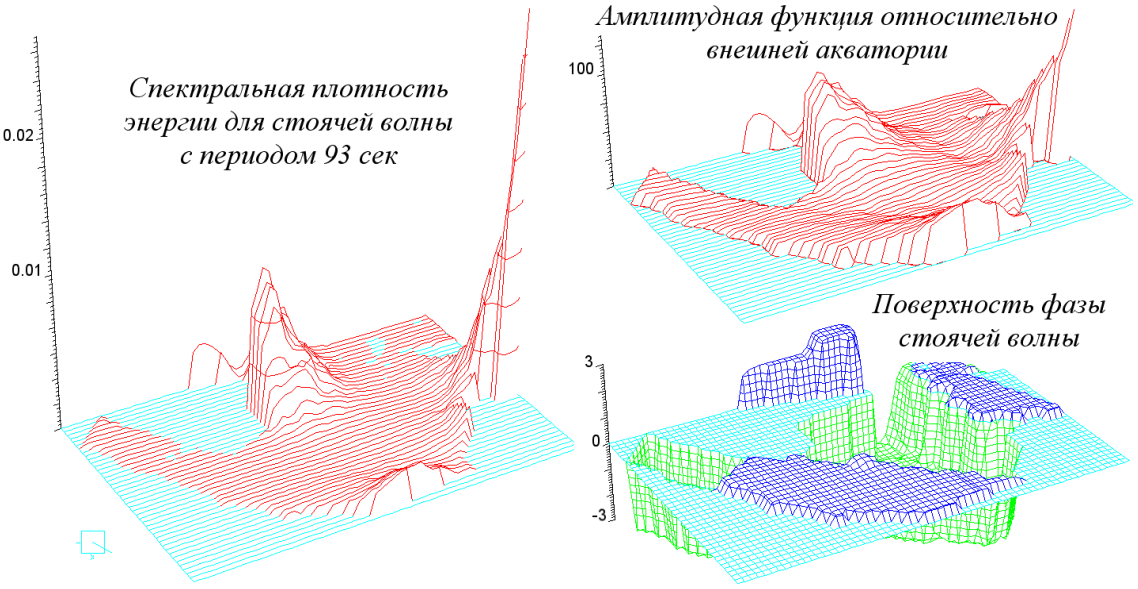


Рис. 41. *Визуализация пространственного распределения функции энергетического спектра (слева), амплитудной функции (справа вверху) и относительной фазы (справа внизу) для стоячей волны с периодом 1 мин 32 сек в порту Холмск*

Если в порту образуются стоячие резонансные колебания уровня моря, то фазовые функции должны образовывать плоскости с резкими границами разрывов на величину π. Такие линии разрывов являются линиями смены фаз стоячих колебаний (узловые линии), и обычно расстояние между ними соответствует полудлине конкретной волны,

которая может длительное время самостоятельно существовать на акватории порта.

Устойчивая волновая мода с периодом 1 мин 32 сек (рис. 41) образуется длинноволновым откликом по максимальному расстоянию между мелководьем у северного мола и дальней границей у причала в южной гавани порта. Маршрут волновых движений этой волны проходит по очень сложному рельефу дна порта и имеет проницаемую границу со стороны открытого моря, что не позволяет этой волне активно проявляться у причалов. Если же волна с таким периодом будет нагнетаться со стороны моря, то она проявится только в волновых ловушках и у стенки внутреннего мола.

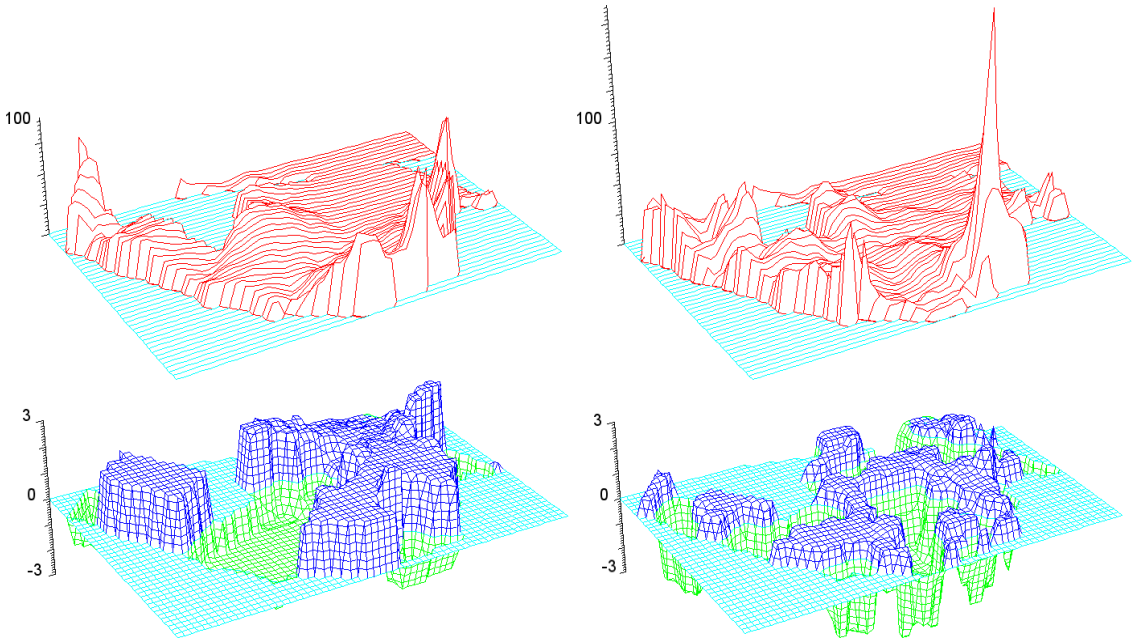


Рис. 42. *Форма установившихся длинноволновых колебаний уровня моря, аккумулирующих волновую энергию с периодом собственных колебаний 55 сек (слева) и 26 сек (справа). На верхних рисунках показана форма превышений амплитуд поверхности моря по отношению к входным воротам порта. На нижних – плоские поверхности равных фаз*

Волновые моды с периодами 55 и 26 секунд (рис. 42) образуются на хорошо обусловленных волновых резонаторах и являются наиболее опасными для судов, находящихся в порту. Эти колебания уровня моря имеют ярко выраженные узловые линии у рабочих причалов порта, что означает возможность появления здесь больших скоростей

течений, что ассоциируется с явлением тягуна. Однако для развития подобных длинноволновых колебаний довольно редко создаются штормовые условия на подходах к Холмскому порту, так как зыбь с такими большими периодами в Японском море практически не наблюдается.

Другие, более высокочастотные длинноволновые колебания уровня моря образуются и аккумулируются на локальных участках акватории Холмского морского торгового порта (рис. 43), они реализуются при любом шторме, но большой опасности для стоящих в порту судов не представляют.

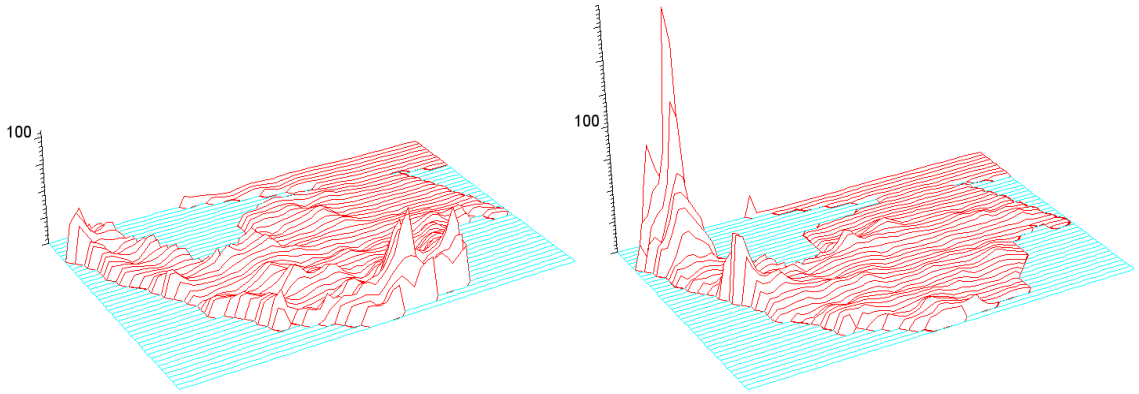


Рис. 43. *Характерные распределения передаточных функций для амплитуд волн относительно входных ворот порта с периодами 10,81 секунды (слева) и 6,86 секунд (справа). Масштаб у обоих рисунков одинаков.*

Из анализа результатов вычислительного эксперимента для акватории порта было выявлено несколько плоских придонных террас, которые способствуют усилению волнения в порту при прохождении сильных штормов. Все эти террасы ограниченны с одной стороны берегом, а с другой – резкими свалами глубин: *первая* – с глубиной около 2,5 м, образовавшаяся в результате разрушения внутреннего мола и углубления фарватера для второй очереди паромной переправы; *вторая* – обширная мелководная терраса с глубиной около 1,5 м между молом внутреннего ковша и глубоководным фарватером; *третья* – плоское мелководье с глубинами 1-1,5 м в северной части порта.

Рекомендации по улучшению волнового режима сводятся к уничтожению всех подводных горизонтальных террас, чтобы на их месте остались только плавные (*клинообразные*) наклоны морского дна, что

не допустит аккумуляции волновой энергии на акватории порта. Безусловно, полезным было бы восстановление всех внутренних молов, которые, в соответствии с исходным проектом и с результатами численного моделирования, способны эффективно стабилизировать уровень моря при поступлении на акваторию порта поверхностных (*Герстнеровских*) волн со стороны штормового моря.

Основные теоретические предложения и прикладные задачи в целом хорошо согласовались с выводами совместного анализа результатов прямых вычислительных экспериментов, наблюдений на Холмском мореографе и оценочными измерениями волнового режима на борту НИС «Гордиенко».

Использование сети мареографов, непрерывно поставляющих информацию о состоянии моря в единый аналитический центр, могло бы позволить существенно повысить эффективность морских служб Сахалинской области, отвечающих за безопасность человеческой жизни на море и оперативный прогноз опасных морских явлений на побережье.

Малые автономные надводные корабли-роботы способны создать наилучшие технические условия для современных телеметрических измерительных систем, обеспечивающих доставку информации из акваторий, недоступных для постановки стационарных постов и судов с человеком на борту.

Автономные гидрофизические модули

В настоящее время активно разрабатываются и развиваются новые перспективные проекты сверхмалых автономных и телеуправляемых плавсредств для решения задач гидрофизического мониторинга и контроля морских акваторий

Современная навигационная, гидрографическая и гидрометеорологическая измерительная техника претерпевает быстрое совершенствование, качественное обновление, и уже способна легко вмещаться в малые габариты морской робототехники. Ее использование предоставляет принципиально новые возможности для повышения эффек-

тивности мореходства и обеспечения безопасности штормового мореплавания; для обеспечения морских служб информацией о состоянии моря, в том числе необходимой для прогноза опасных морских явлений и оперативного гидрографического и гидрометеорологического обеспечения морских работ.

Возможность одновременного использования нескольких гидрофизических модулей, синхронно работающих в системе единого времени, в сложных и штормовых условиях плавания, где присутствие человека небезопасно или нежелательно, делает такие корабли-роботы незаменимым средством для эффективного решения задач реального мониторинга состояния морских акваторий, контроля недопустимости экологически необратимых процессов в морских водах и оперативного обнаружения потенциально опасных морских явлений с целью предотвращения аварийности или ликвидации последствий морских катастроф.

При проектировании автономных гидрофизических модулей вопросы штормовой мореходности становятся определяющими, так как для сверхмалых судов практически любое волнение на море становится подобием ураганов в отношении обычных крупных судов – прототипов.

1. Автономные корабли-роботы дальнего плавания необходимы для всепогодного присутствия в удаленных районах прибрежных морей и Мирового океана. Обладая уникальной мореходностью в условиях интенсивного волнения, надводные корабли-роботы способны поддерживать оперативный обмен информацией по каналам дальней или космической радиосвязи. Как вариант, для исключения захвата или повреждения автономного корабля, на время акустического контакта с близкопроходящими морскими судами он может погружаться под воду, поддерживая бесшумное движение вперед в режиме полупогружного или подводного судна.

2. Автоматизированные сверхмалые гидрофизические корабли, в том числе способные работать в группе под контролем с единого поста управления, необходимы для обследования судоходных фарватеров и мелководных прибрежных акваторий, обеспечивая надежную

работу морского измерительного оборудования в сложных и опасных условиях плавания, где присутствие плавсредств с человеком на борту нежелательно или небезопасно;

3. Телеуправляемые самоходные гидрофизические модули малых размеров, способные проводить гидрографические изыскания в гаванях портов и прибрежных бухтах, в том числе в прибойной зоне вблизи побережья или заросших водорослями акваториях, несущие на борту комплексы измерительных датчиков, обеспечивающих анализ информации и выработку команд телеуправления на компьютере удаленного берегового или корабельного поста.

Техническая реализация всех трех проектов малых кораблей-роботов основывается на использовании компактной телемеханики и вычислительной техники, современного навигационного и гидрофизического оборудования.

Особенности традиционных методов контроля морских акваторий и сопоставление их с возможностями автономных гидрофизических модулей (*преимущества и недостатки*):

1. *Надводные корабли и малые плавсредства с экипажем на борту:*

1.0. Дальность и автономность плавания, поддержание связи – *без преимуществ*;

1.1. *Преимущества:* анализ получаемых данных в походных условиях; ремонт и настройка неисправного оборудования; борьба за живучесть морского судна;

1.2. *Недостатки:* высокая стоимость морских работ; невозможность решения задач в сложных навигационных и в штормовых условиях плавания; опасность для людей при работе на мелководье и в прибойной зоне вблизи побережья.

2. *Береговые посты:*

2.0. *Без преимуществ*: непрерывный контроль состояния прибрежных акваторий;

2.1. *Преимущества*: возможность развертывания особо сложной аппаратуры, например для дистанционного контроля состояния моря;

2.2. *Недостатки*: невозможность прямых измерений на большом удалении от берега;

3. *Авиация*

3.0. Поддержание постоянной связи с берегом – *без преимуществ*;

3.1. *Преимущества*: высокая скорость прибытия в новый район мониторинга; дистанционный контроль больших по площади морских акваторий;

3.2. *Недостатки*: высокая стоимость работ; зависимость от условий погоды; малая автономность и ограниченное время проведения измерений;

4. *Подводные аппараты*

4.0. *Без преимуществ*: автоматическое управление морским роботом; возможность использования сложной измерительной аппаратуры;

4.1. *Преимущества*: абсолютная скрытность; возможность доставки и использование сложной измерительной аппаратуры в подводном положении;

4.2. *Недостатки*: невозможность эффективного использования высокоточных радионавигационных систем, средств дистанционного управления и получения информации от аппарата в подводном положении; слишком малая дальность управляемого плавания при использовании кабельных или гидроакустических систем телеуправления;

Эффективность использования автономных подводных аппаратов могла бы быть значительно увеличена, если в качестве судна сопровождения будут использоваться малые надводные всепогодные корабли-роботы, обеспечивающие надежные средства навигации и связи для принципиально «слепых и немых» подводных аппаратов. В частности для обеспечения позиционирования подводных средств, надводные модули могут в автоматическом режиме расставить и затем собрать пространственно разнесенные гидроакустические маяки и связанные с ними поверхностные буи.

Таблица 3. Критерии функциональности традиционных средств контроля обстановки на море

Тип	*Дальность (самостоятельный ход в открытом море)*	*Автономность (длительность мониторинга)*	*Скрытность (отсутствие влияния на водную среду)*	*Оперативность (быстрый отклик на запросы центра управления)*
Надводный корабль	✓✓	✓✓	✗✗	✓✓
Береговой пост	✗✗	✗✓	✗✓	✓✓
Авиация	✓✓	✗✗	✗✓	✓✓
Подводный модуль	✗✓	✓✗	✓✓	✗✗
Дрейфующие буи	✗✓	✓✓	✗✓	✓✓
Глайдеры	✓✓	✓✓	✗✓	✗✗

Всепогодные корабли-роботы способны самостоятельно решать широкий круг морских задач контроля морских акваторий, а их использование совместно с традиционными техническими средствами и методами контроля морских акваторий (табл. 3) может многократно повысить эффективность морских работ в целом.

Обзор современных средств морской робототехники

В качестве аналога по функциональным возможностям и приборному оснащению можно показать автоматизированное судно-робот (**Above-water Autonomous Vehicle, AAV**) «**Mimir AV1**», представленный на рынке морских измерительных комплексов английской компанией **QinetiQ**.

«Mimir» представляет собой тримаран (рис. 44) с наибольшей длиной 3 м и шириной 1,5 м. На борту модуля установлен одноцилиндровый дизельный двигатель мощностью 9 л.с. Управление судном ведется автономно, с помощью бортового компьютера, который одновременно обеспечивает поддержание информационного обмена с береговым центром по стандартным сетевым протоколам. На борту модуля используется измерительное оборудование, рассчитанное для работы на глубинах до 60 м:

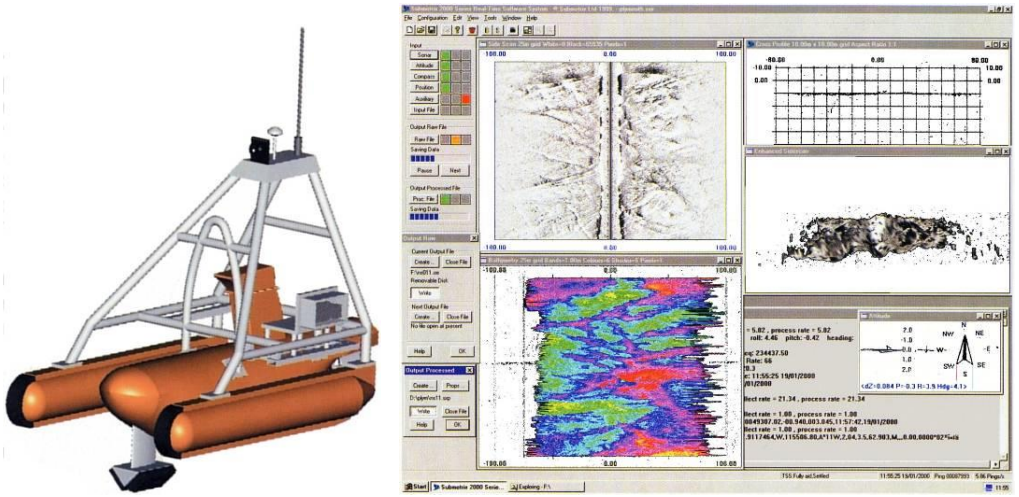


Рис. 44. Быстроходный гидрофизический модуль «Mimir» *(слева) несущий на борту полный комплекс гидрографического оборудования, и управляемый по высокоскоростным каналам передачи данных. Береговая консоль управления бортовым компьютером на Mimir (справа).*

- гидролокатор бокового обзора;

- измерители растворенных в воде нитратов, нитритов, фосфатов и содержания кислорода;

- зонд для получения вертикальных профилей температуры, солености и плотности воды;

- комплекс аппаратуры Seabird для работы с пробами воды;

- аппаратура для подводного и надводного видео.

Навигационное оборудование способно работать с глобальной системой позиционирования – GPS, в том числе в дифференциальном режиме – DGPS.

Недостатком модуля «Mimir» является его низкая мореходность в условиях интенсивного морского волнения, что обусловлено слишком большой шириной корпуса тримарана. «Mimir», обладая высокой скоростью хода, способен опрокинуться на корабельной волне от проходящего мимо судна.

Ныряющий модуль «Glider» (рис. 45) является автономным кораблем дальнего плавания. При погружении модулю придается дифферент на нос и отрицательная плавучесть, и он, плавно погружаясь под воду, движется вперед со скоростью порядка 1 м/с. При достижении 200-метровой глубины, «Glider» откачивает балласт и начинает

медленное всплытие с дифферентом на корму, что также обеспечивает ход вперед с той же скоростью.

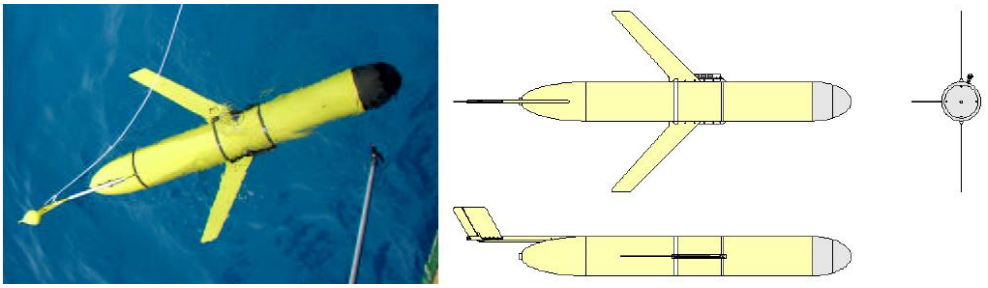


***Рис. 45. Гидрофизический модуль**: «SLOCUM Electric Glider».*

В момент всплытия «Glider» определяет свои географические координаты, вносит поправки на дрейф и курс по компасу, затем снова программирует свое движение для нового подводного нырка на дальность порядка 2 км. Перемещаясь в подводном положении «Glider» утрачивает оперативные каналы связи с береговыми центромами.

Технические особенности построения сверхмалого корабля

Оптимальным и более надежным в эксплуатации видится использование автономного надводного гидрографического корабля, обладающего хорошей штормовой мореходностью, и способного обеспечить эффективную работу всех бортовых измерительных комплексов в любых погодных условиях, как за счет стабилизации качки, так и с помощью высокоточных измерений и прогноза динамики корпуса на штормовом волнении.

В основе проектных изысканий положен поиск математических моделей взаимодействия корпуса корабля со штормовым морем и атмосферой (рис.46), приводящих к оптимизации формы корпуса с позиций минимизации внешних силовых воздействий. Параллельно решаются технические задачи по размещению агрегатов телемеханики, навигационного и гидрофизического измерительного оборудования; определению законов автоматического управления автономным модулем, в том числе в сложных и штормовых условиях плавания. Важнейшим мореходным качеством сверхмалого корабля является сохранение вертикальности его корпуса, что необходимо как для устойчи-

вой работы подводных гидроакустических средств, так и для обеспечения устойчивой радиосвязи и космической радионавигации.



Рис. 46. Мореходные испытания гидрофизического модуля *на обрушающейся штормовой волне при ветре порядка 10-12 м/с. Модуль преодолевает косым курсом гребень обрушающейся волны и практически не отражает ее от своего корпуса*

Относительно невысокая скорость хода сверхмалых кораблей вполне согласуется с требованиями по работоспособности бортовой гидроакустической и гидрофизической измерительной аппаратуры. Успешное маневрирование в штормовых условиях, не может поддерживаться традиционным человеческим опытом по штормовому управлению крупным судном, поэтому решения о курсе и скорости хода должны приниматься бортовым компьютером на основе специальных математических моделей, прогнозирующих динамику взаимодействия корпуса с фронтами ближайших штормовых волн (рис. 46).

Для описания внешней среды могут быть использованы вышеописанные эвристические модели штормового волнения, основанные на групповых структурах Кельвина для трохоидальных волн большой высоты. Поверенная хорошей морской практикой эмпирическая модель позволяет алгоритмическими методами контролировать трехмерное поле скорости в приповерхностной зоне вблизи движущегося корабля. В целом это формирует достаточный комплекс условий для решения задачи об автоматическом маневрировании корабля, где условиями оптимума могут выступать как минимальность силового воздействия крупных штормовых волн на корпус корабля, так и поиск

наиболее эффективного или благоприятного для морских работ курса и скорости хода.

Одновременно с выработкой параметров для адаптивных моделей управления, автономный модуль сможет выполнять анализ гидродинамического и штормового режима на поверхности моря, непрерывно доставляя результаты в удаленные морские службы по цифровым каналам радиосвязи. Именно эта информация является ключевой для оперативных морских служб, отвечающих за выработку прогнозов опасных морских явлений и обеспечивающих безопасность ведения работ и судоходства в открытом море.

Проведенные испытания оптимизированного для плавания в условиях интенсивного морского волнения гидрофизического модуля, подтвердили правильность выбора в качестве базовых прототипов проекты быстроходных эсминцев конца XIX – начала XX веков.

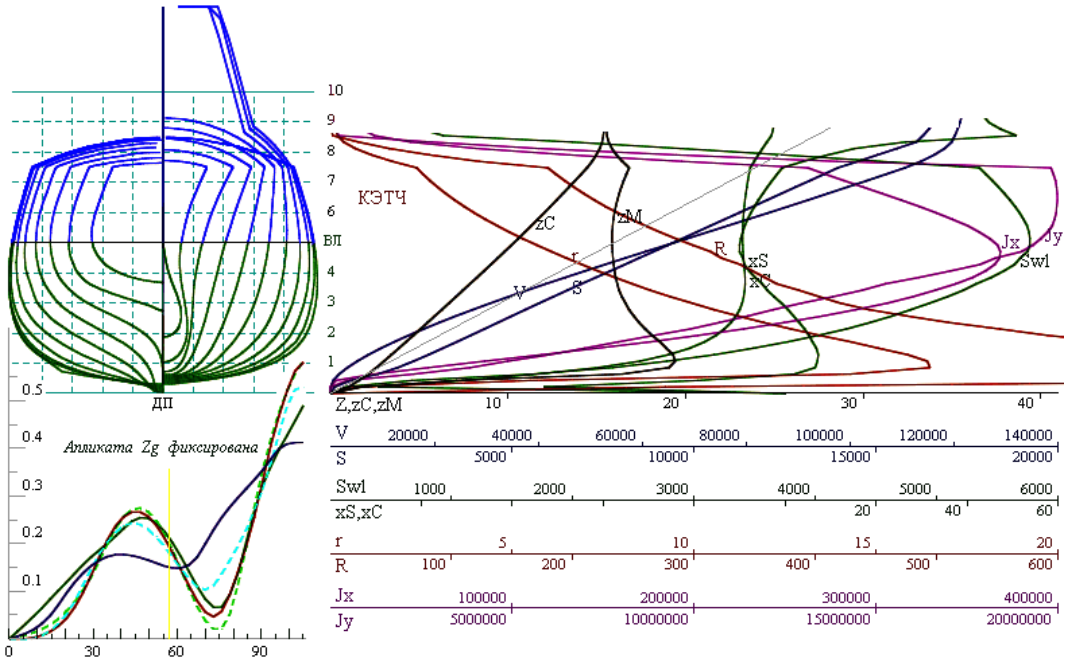


Рис. 47. Гидрофизический модуль. *Справа – гидростатические кривые элементов теоретического чертежа. Слева внизу – кривые остойчивости при нулевой метацентрической высоте.*

Принятый к использованию теоретический чертеж корпуса (рис. 47), придает положительную остойчивость гидрофизическому модулю на всех углах крена, в том числе при его опрокидывании, одновременно обеспечивая возможность поддержания практически ну-

левой метацентрической высоты (*на тихой воде на ровном киле*). Округлый мидельшпангоут, острая крейсерская корма, заостренная и с очень малым надводным объемом носовая часть корпуса обеспечивают минимальное кренящее и дифферентующее воздействие морских волн на корпус корабля, придавая ему вполне приемлемую пассивную стабилизацию на волнении. Формально это означает, что остаточную качку можно успешно компенсировать с помощью активных успокоителей, расположенных в наиболее стабильном потоке за корпусом корабля – в поле действия его движителей под кормовым подзором.

Отметим все же, что автономному гидрофизическому модулю с оптимизированным корпусом не страшны захваты волной, кратковременные погружения под гребни штормовых волн и даже опрокидывания. В этом случае произойдет кратковременное нарушение в работе гидроакустических и радионавигационных систем, что ни в коей мере не повлияет на возможность быстрого самовосстановления параметров штормового движения корабля, и последующего восстановления способности к выполнению поставленных задач.

Неограниченный район плавания достигается с помощью автоматической штормовой навигации, а повышенная надежность сверхмалого гидрографического корабля обеспечивается с помощью прочного и герметичного корпуса, пассивного к воздействию морских волн и способного выдерживать удары о морское дно при движении по зыби на прибрежных мелководьях.

Для достижения ходкости и маневренности сверхмалого корабля в сложных и штормовых условиях плавания, в качестве маршевых движителей планируется применение гибких малошумных плавников (рис. 48), одновременно являющихся рулями и успокоителями качки. В обоснование эффективности плавниковых движителей проводится цикл фундаментальных исследований в области построения прямых вычислительных экспериментов по моделированию и оптимизации нестационарной гидромеханики машущего крыла (Патент RU-2360831).

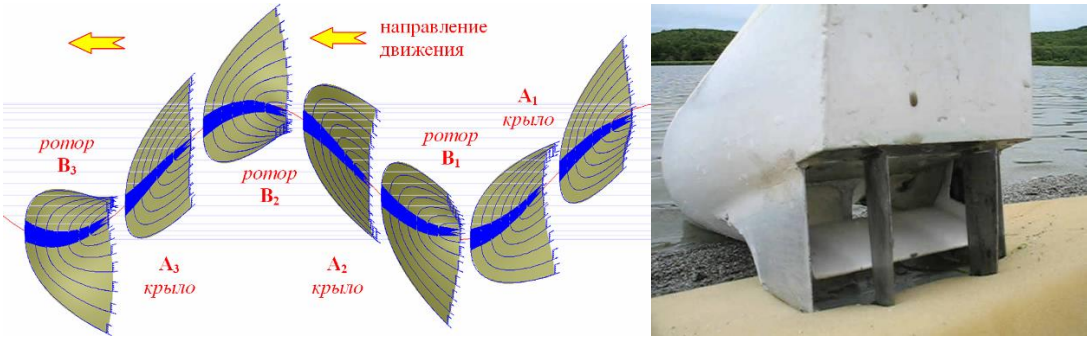


Рис. 48. Кинематическая схема машущих движений симметричного гибкого плавникового движителя *(слева) и фото экспериментальной модели с жестким машущим плавниковым движителем, взятым в короб из граничных плоскостей и концевых шайб, с двумя вертикальными рулями управления (справа).*

В движении жесткие ребра плавника всегда опережают упруго изгибающуюся поверхность гибкого крыла, что способствует заданной динамике вихреобразования вблизи движителя в целом. Максимальная скорость поперечного изгиба поверхности гибкого плавника приходится на его распрямленное состояние в среднем положении с максимальным углом атаки. В крайних участках траектории крыло получает максимальный поперечный изгиб, при котором кромки плавника выворачиваются для подержания непрерывности упора о концевые индуктивные вихри.

Движитель служит рулем и стабилизатором качки одновременно, что достигается отклонением и искривлением средней линии плавника в процессе его рабочих раскачиваний. Наилучший эффект достигается при необходимости минимального воздействия на поверхностные воды при гидробиологических исследованиях; а также в сложных условиях плавания, когда традиционные гребные винты повреждаются льдом, донными камнями, или забиваются водорослями.

Оптимальные проекты сверхмалых кораблей различного назначения

К настоящему времени проведены первые оценочные испытания, начата отработка программно-технических комплексов для двух вариантов сверхмалых автономных гидрографических кораблей:

1) телеуправляемый самоходный модуль, обеспечивающий обследование морских и портовых акваторий с непрерывной доставкой измерительной информации по радиоканалам на единый пост управления и анализа данных, с компьютера которого подаются команды на управление двигателями, рулевыми устройствами, стабилизаторами качки и другими бортовыми механизмами самоходного модуля. Водоизмещение 20 кг при полезной приборной нагрузке 5 кг, длина корпуса 1,6 м, скорость экономичного хода 3-4 узла, автономность по запасу энергии аккумуляторов до 8 ч;

2) сверхмалый автономный корабль, способный преодолевать расстояния до 1000 морских миль под программным управлением бортового компьютера. Самостоятельно решая определенный круг задач в удаленных морских и прибрежных акваториях, такой модуль может периодически высылать сообщения о своем техническом состоянии и передавать текущую океанографическую информацию по спутниковым каналам связи. Водоизмещение 65 кг при полезной приборной нагрузке 10-15 кг, длина корпуса 2,6 м, скорость хода 5-6 узлов, автономность плавания полным ходом до 300 ч.

Окончательные технические характеристики унифицированного гидрографического корабля должны согласовываться с заказчиком и оптимизироваться в процессе разработки конкретного проекта нового корабля. В частности, проектируемому гидрофизическому модулю может быть придано свойство ныряющего подводного аппарата, что отчасти расширит круг задач обследования морских вод, и обеспечит его безопасность при попытке захвата, или при осложнениях маневрирования в условиях ураганных штормов. Длительность времени погружения под воду, в том числе с посадкой на морское дно, может определяться по команде из берегового центра управления, что может делаться, в том числе, для экономии ресурсов бортовой энергетической установки.

Сверхмалые гидрофизические модули, по суше доставленные на побережье, смогут обеспечить морские гидротехнические изыскания в сложных условиях ветрового волнения и прибрежной зыби на мелководьях, ныне реализуемые только в составе длительных морских и

прибрежных экспедиций, время работы которых регулируется условиями погоды и гидродинамической активностью прибрежных вод при прохождении как близких, так и дальних штормов.

Будущие испытания новых и готовых к практическому использованию гидрофизических модулей должны проводиться в реальных условиях плавания, в том числе в Охотском и Японском морях, в гаванях и бухтах Сахалина и Курильских островов. В морских испытаниях одновременно изучаются технические условия эксплуатации навигационного, гидроакустического, гидрофизического и другого измерительного оборудования, отрабатываются практические вопросы дистанционного управления сверхмалым кораблем и получения с него телеметрической информации.

III. Проектные особенности корабля повышенной штормовой мореходности

В качестве ведущей концепции непротиворечивого целевого проектирования корабля используются инженерно-технические решения, основанные на принципе непротивления силовому воздействию со стороны штормовых волн и ураганного ветра, что позволяет не только добиваться снижения всех видов качки и обеспечения комфортности обитания, и безусловной безопасности крепления грузов и оборудования на борту судна, но, также, согласовать режимы гидродинамической взаимокомпенсации влияния формы, инерции и гравитационной массы судна на ходу в условиях крупного волнения, обеспечивая, тем самым, всепогодность эффективной эксплуатации судна в соответствие с предназначением.

Теоретическое изучение волновых процессов

Современные математические модели корабельного волнообразования и взаимодействия корпуса корабля с морским волнением не позволяют получить законченных численных решений об оптимальной форме корпуса, что связано со слабой разработанностью трехмерных моделей вычислительной гидромеханики. Построение многовариантных процессов оптимизации формы корпуса с использованием сложных численных схем для решения трехмерных задач гидромеханики со свободными поверхностями также затруднительно из-за ограниченных мощностей современных компьютеров.

Аналитическое изучение волнового сопротивления корабля берет свое начало от работ Джона Генри Мичелла [Michell J. H., 1898], где был предложен «вполне» определенный интеграл, с указаниями на допущения о малости возмущений, вносимых движущимся узким корпусом корабля [Павленко, 1953]:

$$R_X = \frac{\rho \ g^2}{\pi V_0^{\,2}} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left| \int_\Omega \frac{\partial \ f}{\partial x} \cdot e^{k\cdot(-z+ix\cdot\cos\vartheta)} d\Omega \right|^2 \frac{d\vartheta}{\cos^3\vartheta} \qquad (1)$$

где: $f = f(x,z)$ – ординаты формы корпуса; V_0 – скорость корабля; Ω - элементарная площадка на обшивке корпуса; $\vartheta = \arccos V/V_0$ - фазовый угол Кельвина, задающий направление излучения (отражение) корабельных волн с частотой формы волны: $k = g/(V_0^2 \cdot \cos^2\vartheta)$.

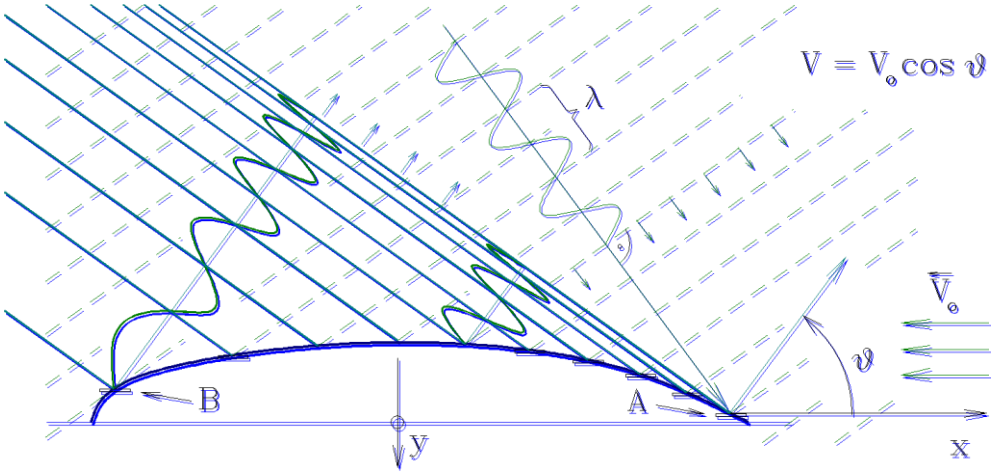


Рис. 1. Геометрическая интерпретация классического интеграла Мичелла *показывает процесс отражения внешних волн от диаметральной плоскости «узкого» корабля. На корпусе происходит существенное искажение фазовых и частотных свойств излучаемых волн. В оконечностях корпуса, вне интервала A-B, излучения волн не происходит. ϑ - угол излучения корабельной волны; V_0 – скорость хода судна.*

Физико-геометрическая интерпретация и анализ численных решений при моделировании гидродинамических процессов в интегралах Мичелла показывают, что уравнениями описывается процесс отражения от корпуса корабля внешних волн (рис. 1) в диапазоне длин: $\lambda \in [\,0 \div \Lambda = 2\cdot\pi\cdot V_0^2/g]$, что соответствует первой половине фазового угла: $\vartheta \in 0 \div \pi/2$, в то время как недостающая для замыкания интеграла четверть горизонта: $\vartheta \in \pi/2 \div \pi$ определяет падающую на корпус «внешнюю волну». Следовательно, математическая оптимизация подводных обводов и надводной формы корпуса сводится к поиску технических решений, обеспечивающих прохождение штормовой волны через корпус с минимальными искажениями.

То есть для недопущения отражения штормовой волны от бортовой обшивки корпуса и для ослабления передачи волновой энергии на опасное усиление рыскания и качки корабля необходимо оптимизиро-

вать волновое сопротивление на всех скоростях хода, включая высокоскоростные режимы с числами Фруда: Fn≥0,5, на которых происходит образование корабельных волн с такими же параметрами, как и внешнее морское волнение *(аналогичные решения по оптимизации обводов корабля и его надводного облика способствуют скрытности в лучах гидро- и радиолокаторов)*.

Следовательно, справедлив вывод о том, что минимизация волнового сопротивления корабля на всех скоростях хода, включая закритически высокие, будет снижать силовое воздействие на корабль со стороны внешнего штормового волнения. Аналогичный вывод иллюстрировался в технико-историческом анализе мореходности (§1, рис.29) с помощью простых геометрических построений процессов взаимодействия корпуса корабля и морского волнения.

Рис. 1 показывает также, что аналитическое представление процесса «отражения» внешних волн от движущегося корпуса корабля не вполне адекватно учитывает реальную картину корабельного волнообразования, так как «теоретически» регулярные внешние волны при отражении от широкого корпуса корабля претерпевают очень сильные частотные (доплеровские) искажения, а в оконечностях корпуса происходит не отражение, а накопление волновой энергии. Соответственно, для корректного учета особенностей корабельного волнообразования снова необходимо искать инженерные (эвристические) подходы с использованием геометрической и динамической интерпретации потоков жидкости вблизи корпуса, особенно в его оконечностях.

Математическая оптимизация подводных обводов и надводной формы корпуса и надстроек корабля, по сути, является поиском технических решений, обеспечивающих прохождение штормовой волны через корпус с минимальными искажениями. Аналогичные математические модели задают отражение от корпуса гидроакустических или радиолокационных волн, откуда следует дополнительное предположение, что оптимизация штормовой мореходности способствует скрытности корабля в море, а исторические корабли начала XX века удовлетворяли требованиям современных стеллс – технологий.

Основные обозначения и соотношения кинематики корабельных волн

$\{ x, y, z \}$ *Координаты в связанной с корпусом системе координат (СК);*

$\{ x_o, y_o, z_o \}$ *Точка, лежащая на поверхности корпуса;*

$\{ \xi, \eta, \varsigma \}$ *Координаты в СК неподвижной относительно жидкости на бесконечности;*

$\{ \xi_0, \eta_0, \varsigma_0 \}$ *Точки на свободной поверхности взволнованной жидкости;*

V_0 *Скорость набегающего потока* [м/с];

$Fn = V/\sqrt{g \cdot L}$ *Число Фруда (скорость относительно продольной волны);*

$\lambda/L = 2\pi \cdot Fn^2$ *Отношение длины поперечной волны, излучаемой кораблем к длине его корпуса, выраженное с помощью числа Фруда;*

$k = \dfrac{g}{V_0^2 \cdot \cos^2 \vartheta}$ *Частота формы волны* [1/м];

$C = V_0 \cdot \cos^2 \vartheta$ *Скорость волны, излучаемой в направлении* $\angle\vartheta$ [м/с];

$\vartheta = \arccos V/V_0$ *Фазовый угол Кельвина, задающий направление распространения "плоских" волн, образуемых корпусом корабля на частоте излучения параметра* ϑ;

$V = V_0 \cos \vartheta$ *Скорость распространения волны в направлении* ϑ;

$\sigma = g/V = \sqrt{g \cdot k}$ *Частота волновых колебаний (во Времени)* [1/с];

$\vec{r}$ *Отклонение частицы жидкости от невозмущенного состояния* [м];

$\zeta_W(\vec{r})$ *Аппликаты волнового профиля* [м];

$Q(\vec{r}) \cong V_0 \cdot q$ *Интенсивность распределенных по поверхности корпуса особенностей, моделирующих движение в безграничной жидкости* [м/с];

$\sigma^2 = \omega^2 = g \cdot k$ *Дисперсионное соотношение для волн на глубокой воде;*

$\lambda = g \cdot T^2 / 2\pi = C^2 \cdot 2\pi/g$ *Соотношение между длиной, периодом и скоростью движения гребней волн на глубокой воде* [м].

Интеграл Мичелла далеко не исчерпал своих аналитических возможностей, и в случае углубленной физико-геометрической интерпретации его подынтегральных выражений, возможен не только уточненный расчет волнового сопротивления корабля, но и качественный

анализ волнообразования в непосредственной близости к обшивке корпуса, в том числе с целью оптимизации формы судовых обводов.

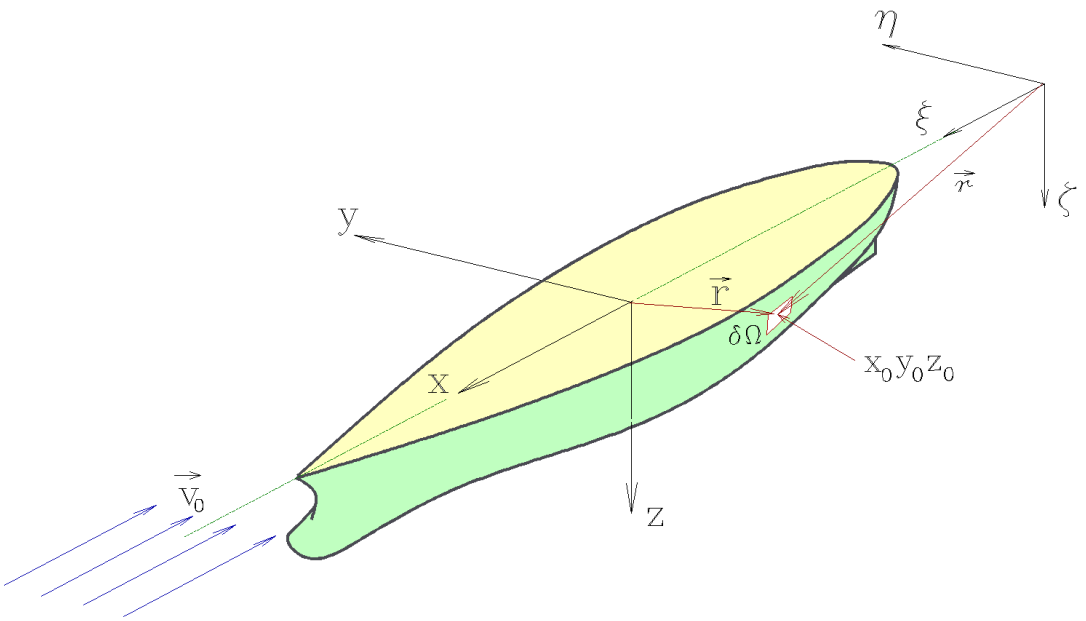


Рис. 2. Система корабельных координат

Интеграл Мичелла содержит сложные сингулярные и осциллирующие подынтегральные выражения, которые без применения специальных аппроксимационных и асимптотических методов оказываются недоступными для уверенных вычислений на современных цифровых ЭВМ.

Существуют различные методы получения интеграла для расчета волнового сопротивления по Мичеллу с включением нелинейных моделей и особенностей волнообразования, которые пока не будут рассматриваться здесь. Основная цель рассмотрения линейной теории волнового сопротивления состоит в поиске наглядной геометрической и физической интерпретации вычислительных процессов, моделирующих корабельное волнообразование. Понимание основы и сути моделируемых явлений необходимо для построения уточненных полуэмпирических моделей и формул, учитывающих свойства реальных корабельных волн, что очень важно для практики, так как процессы волнообразования, равно как и процессы вихреобразования, относятся к фундаментальным и неосвоенным математическим моделям нестационарной гидромеханики.



Рис. 3. Характерная картина волнообразования при равномерном и прямолинейном движении судна по спокойной поверхности воды. *(λ/L) =0,5; V=13 узлов, За кормой отчетливо просматривается система поперечных корабельных волн, ограниченная треугольником свободных расходящихся волн.*

Традиционно корабельные волны разделяются на поперечные и расходящиеся, что соответствует наблюдениям за внешним проявлением волнообразования при движении корабля. В непосредственной близости от корпуса корабля такое разделение корабельных волн на поперечные и расходящиеся весьма условно, однако оно вполне справедливо при рассмотрении особенностей распространения волн на большом удалении от корпуса, где поперечные волны ведут себя как вынужденные, а расходящиеся - как свободные, с ярким проявлением особенностей их групповой структуры.

В случае хорошо обтекаемого корпуса справедливо также допущение о стационарности формы волнового поля относительно движущегося корабля, что является ключевым упрощением особенностей реального корабельного волнообразования, используемого при теоретическом изучении волнового сопротивления его движению.

Плоская модель поперечных волн

Плоская модель корабельного волнообразования рассматривает интерференцию зарождающейся поперечной волны при прохождении потоков воды вдоль корпуса корабля и позволяет сделать самые первые оценки процессов зарождения корабельных волн.

Вне зависимости от формы корпуса за кормой корабля образуется регулярная система поперечных корабельных волн, длина и период которых строго связаны со скоростью хода корабля: $\lambda_W = V_0^2 \cdot 2\pi/g$; $\tau_W = V_0 \cdot 2\pi/g$. Такое свойство системы поперечных волн позволяет довольно просто оценить реальную скорость хода корабля V, воспользовавшись визуальным соотношением расстояния между гребнями волн λ и длиной корабля L : $(\lambda/L) = V^2 / L \cdot 2\pi/g$, откуда:

$$V \approx 1.25 \cdot \sqrt{(\lambda/L) \cdot L} = 1.25 \cdot \sqrt{\lambda} \quad [\text{m/c}].$$

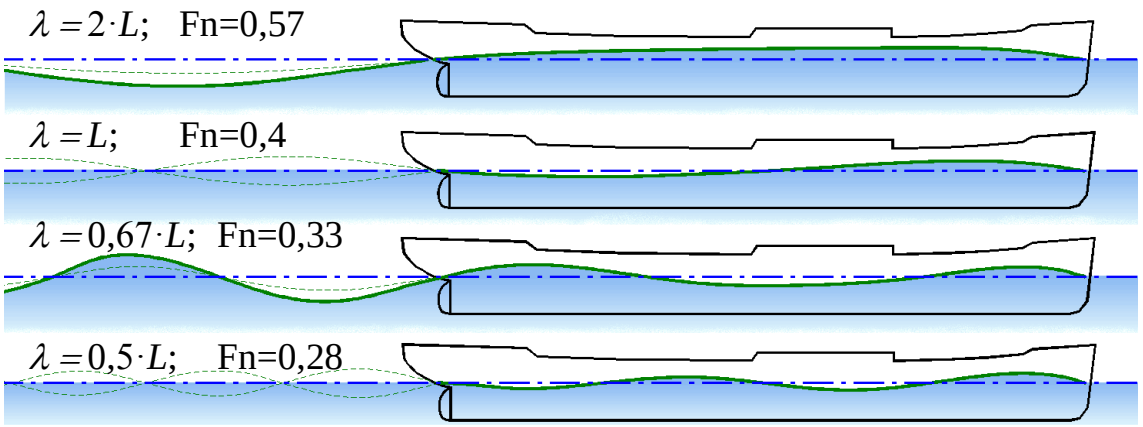


Рис. 4. Характерные режимы волнообразования при различных скоростях движения судна.

В качестве безразмерного и независимого от длины корпуса параметра, характеризующего волнообразование на различных скоростях хода корабля, принято число Фруда:

$$\text{Fn} = V/\sqrt{g \cdot L},$$

которое также связано с отношением длины поперечной волны к длине корпуса корабля: $(\lambda/L) = 2\pi \cdot \text{Fn}^2$

или $\text{Fn} = \sqrt{\dfrac{\lambda}{2\pi \cdot L}} \approx 0.4 \cdot \sqrt{(\lambda/L)}$.

Теоретически получается, что при длине поперечной корабельной волны, строго равной длине корпуса, может ожидаться наиболее благоприятная интерференция носовой и кормовой систем волн. Однако на практике реальная волнообразующая длина корпуса всегда меньше, отчего искомый минимум волнового сопротивления умень-

шается со значения Fn≈0,4 до Fn≈0,32–0,36, соответствующий рост волнообразования на скорости хода при Fn≥0,57 обычно соотносят с Fn≥0,5.

К сожалению, величину волнообразующей длины корпуса довольно трудно установить однозначно, так как она зависит от изменения скорости хода корабля. Рис. 4 иллюстрирует интерференцию корабельных волн, условно зарождающихся на форштевне и ахтерштевне. В реальности же носовая подпорная волна зарождается в районе скулы, а снижение уровня воды в кормовой части корпуса проявляется в районе кормовой раковины и винто-рулевого комплекса, что обязательно необходимо учитывать при проектировании обводов корпуса. Необходимо также отметить, что на больших скоростях хода, при Fn>0,4, в кормовой части корпуса образуется довольно сильное разрежение, которое при совместном действии с носовой подпорной волной приводит к сильному ходовому дифференту корабля на корму. При дальнейшем увеличении скорости судно как бы начинает толкать перед собой «гору» воды, отчего быстро растет как интенсивность корабельного волнообразования, так и волновое сопротивление движению корабля. Однако эффект столь неблагоприятной интерференции носовой и кормовой систем корабельных волн может быть частично скомпенсирован специальной формой корпуса, ключевым элементом которой должен являться завал бортов на уровне действующей ватерлинии в средней части корпуса.

Для оценки сопротивления воды движению корабля обычно пользуются величиной коэффициента сопротивления $\boldsymbol{C}_W$, отнесенного к квадрату скорости и площади смоченной поверхности (подводной части) корпуса.

$R_W = \boldsymbol{C}_W \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2} \cdot S$, где: R_W – волновое сопротивление [Н]; ρ - плотность жидкости [кг/м^3]; V – скорость хода судна [м/с]; S – площадь смоченной поверхности корпуса [м^2].

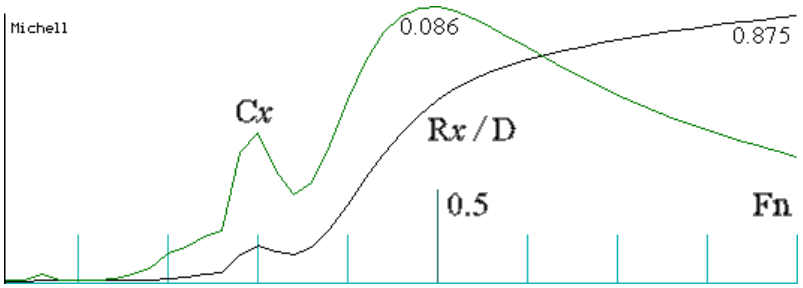


Рис. 5. Характерная форма и числовые оценки расчетных кривых волнового сопротивления для хорошо обтекаемого корпуса корабля*. Cx – коэффициент сопротивления; Rx/D – удельное сопротивление. Хорошо видны экстремумы сопротивления при неблагоприятной интерференции носовой и кормовой систем поперечных волн, возникающей на скоростях хода при Fn≈0,5 (0,57) и Fn≈0,3 (0,33). Полного гашения волнового сопротивления при Fn≈0,26 (0,28) и Fn≈0,35 (0,4) не происходит, что объясняется затратами энергии на зарождение системы расходящихся волн.*

Для оценки формы корпуса и волнового сопротивления иногда удобно пользоваться размерной величиной удельного сопротивления, отнесенного к водоизмещению корабля: R_W / D, где D – водоизмещение [кг]. Если тихоходное судно (Fn≤0,2) обладает хорошо обтекаемым корпусом, то его волновое сопротивление будет пренебрежимо малым.

Особенности расходящихся корабельных волн

Расходящиеся от корпуса корабельные волны проявляются как свободные волны на глубокой воде, они обладают как ярко выраженными дисперсионными свойствами (*увеличение длины и периода волны при ее свободном распространении*), так и групповыми свойствами (*скорость распространения волнового возмущения в два разе меньше скорости движения фронта каждой из волн, образующих волновой пакет*).

Угол расхождения пакетов корабельных волн не зависит от скорости хода корабля и является ярким подтверждением того, что пакеты свободных расходящихся волн движутся со скоростью в два раза меньшей, чем гребни составляющих их волн. Этот угол составляет 20°42’. В 1887 Кельвином получено также решение для корабельных волн от точечного источника на поверхности воды, угол разворота

гребней расходящихся волн составил 35°16’. Любопытно, что Кельвин также использовал эвристический аргумент, основанный на групповой скорости волн [Дж.Ньюмен, 1985].

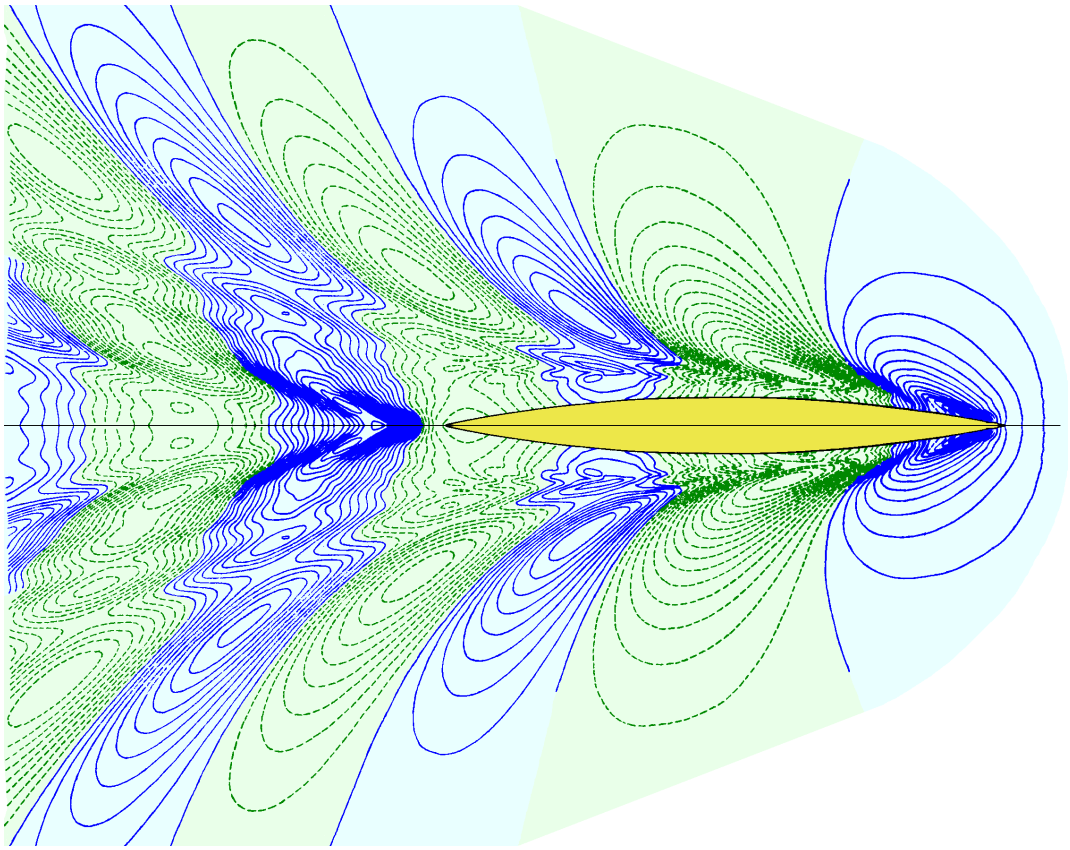


Рис. 6. Картина корабельного волнообразования в непосредственной близости от обшивки корпуса*. Скорость хода Fn=0,316.*

К расходящейся корабельной волне неприменимы методы интерференционного анализа. Единственный способ минимизации энергии расходящейся волны - это построение таких обводов корпуса, которые способствовали бы ее гашению непосредственно в момент зарождения. Обычно это достигается «закручиванием» набегающего потока под днище корпуса в тот момент, когда вихрь зарождающейся волны начинает отрываться от корпуса. Привычные скуловые обводы в носовой и кормовой частях корпуса вполне успешно могут решить задачу минимизации таких расходящихся волн.

Предварительный обзор особенностей корабельного волнообразования можно закончить двумя заключениями, имеющими прямое отношение как к минимизации волнового сопротивления, так и к

уменьшению интенсивности силового взаимодействия корпуса корабля с внешним морским волнением:

1. Минимизация интенсивности поперечных корабельных волн на всех скоростях хода, включая диапазон их длин, превышающих длину корпуса, выполненная на всех осадках, которые возникают при вертикальной качке корабля, одновременно является условием снижения его килевой качки при движении на волнении;

2. Аналогичная минимизация интенсивности расходящихся корабельных волн будет способствовать снижению бортовой качки, возникающей под воздействием штормовых волн в широком диапазоне периодов.



Рис. 7. Крейсер «Москва» *имеет обводы в форме двойного клина и сильный развал бортов вдоль всего корпуса корабля.*

Высказанные заключения являются всего лишь проектными условиями, выполнение которых безусловно необходимо, но отнюдь не достаточно для реального улучшения штормовой мореходности корабля. К примеру, в практике кораблестроения известны примеры использования судовых обводов в форме «двойного клина». «Двойной клин» раздвигает встречный поток в боковые стороны, а под широкий кормовой подзор поток воды поступает из-под днища корпуса. Такие обводы формально приводят к заострению оконечностей, что теоретически влияет на корабельное волнообразование как удвоение длины корпуса, что заметно снижает волновое сопротивление движению корабля. Однако в отличие от традиционного корабля с симметричным относительно мидель-шпангоута обводами, в штормовых условиях корпус в виде «двойного клина» может стать источником серьезнейшей опасности.

До настоящего времени неизвестны достаточно обоснованные математические модели корабельного образования, кроме интеграла Мичелла, которые могли бы использоваться для уверенного проектирования обводов корпуса. Попытка использовать этот интеграл в качестве функционала для выбора оптимальной формы корпуса не приводит к сколь-нибудь однозначным решениям, так как при математической недостаточности внешних условий для формализации судовых обводов получается множество частных решений, иногда курьезных, дающих в качестве оптимальной формы корпуса как «двойной клин», так и различные пульсирующие формы ватерлиний с гиперболизованными размерами носовых бульбов.

Но все же решение Джона Генри Мичелла представляет не только исторический интерес. Детальный анализ промежуточных выкладок при получении интеграла Мичелла позволяет очень глубоко понять суть процессов, происходящих как при формировании корабельных волн, так и при воздействии штормовых волн на корпус корабля.

В настоящее время существуют и другие математические и вычислительные методы для получения результатов, аналогичных Мичелловским, но это уже тема других работ по гидромеханике корабля, в том числе требующих множества новых пионерских исследований. Пока же постараемся не слишком далеко отклоняться от формы и сути математических изысканий конца XIX века, попутно пытаясь привести все выражения к размерным физическим аргументам и функциям, что необходимо для углубленного понимания изучаемых процессов волнообразования и требуется для корректной реализации численных расчетов волнового сопротивления корабля.

Теория волнового сопротивления Мичелла

Основная цель рассмотрения линейной теории волнового сопротивления состоит в поиске наглядной геометрической и физической интерпретации вычислительных процессов, моделирующих корабельное волнообразование. Это необходимо также для поиска аналитических решений, корректных асимптотических приближений и эмпири-

ческих экстраполяций при практическом моделировании процессов взаимодействия корабля и морского волнения.

Оригинальный интеграл Мичелла вполне пригоден для использования в областях разрывных или сильноосциллирующих численных решений, нежели любые его искусственные усложнения с помощью любых нелинейных добавок.

Волнообразующий потенциал

Вывод расчетных формул классической теории волнового сопротивления корабля основывается на анализе скалярных функций векторного аргумента или «теории потенциала»: $\Phi(x,y,z)=\Phi(\vec{r})$. Решение ищется в виде поля скалярного потенциала скорости: $\frac{\partial\Phi}{\partial\vec{r}}=\vec{V}$, удовлетворяющего уравнению Лапласа: $(\frac{\partial}{\partial\vec{r}}\frac{\partial\Phi}{\partial\vec{r}})=0$.[30]

Для исследования волнообразования, вызванного равномерным поступательным движением корабля, пересекающего свободную поверхность жидкости, используем стандартное аддитивное разложение потенциала [Костюков А.А., 1966]:

$$\Phi(\vec{r})=-V_0x+\varphi_0(\vec{r})+\varphi^*(\vec{r})\ [\mathrm{c}^{-1}]; \qquad (2.0)$$

$$\Phi(\vec{r})=-V_0x+\frac{1}{4\pi}\int_\Omega\frac{\mathrm{Q}(\vec{r}_0)}{|\vec{r}|}d\Omega+\frac{1}{4\pi}\int_\Omega\mathrm{Q}(\vec{r})\cdot\mathrm{G}(\vec{r})d\Omega,$$

где: V_0x потенциал набегающего потока; *(2.1)*

$$\varphi_0=\frac{1}{4\pi}\int_\Omega\frac{\mathrm{Q}(\vec{r}_0)}{|\vec{r}|}d\Omega=\frac{V_o}{4\pi}\int_\Omega\frac{\mathrm{q}(\vec{r}_0)}{|\vec{r}|}d\Omega \qquad (2.2)$$

потенциал обтекания корпуса при отсутствии возмущения свободной поверхности;

---

[30] Принятые обозначения формулируются в курсе Физики А.В. Астахова и Ю.М. Широкова [1980]

$$\left(\frac{\partial\vec{\varphi}}{\partial\vec{r}}\right)\equiv div\vec{\varphi}\ ;\ \left[\frac{\partial\vec{\varphi}}{\partial\vec{r}}\right]\equiv rot\vec{\varphi}\ ;\ \frac{\partial\varphi}{\partial\vec{r}}\equiv grad\,\varphi\ .$$

$$\varphi^* = \frac{V_0}{4\pi}\int_\Omega q\cdot G(\vec{r})d\Omega \qquad (2.3)$$

потенциал, учитывающий взаимодействие корпуса со свободной поверхностью жидкости.



Рис. 8. Движение точечного источника (шарика) по поверхности воды. *Образуются расходящиеся корабельные волны, длина которых соизмерима с диаметром шарика. Поперечные же волны, скорость которых соответствует скорости движения источника возмущения, практически не образуются, и просматриваются только один раз в виде одиночного всплеска в следе за шариком. Расходящиеся гравитационные волны постоянно изменяют фазу своего переднего фронта, показывая, что волновое возмущение в целом движется в два раза медленнее, чем фронт одиночной трохоидальной волны. Впереди основных волн выстраиваются фронты коротковолновых капиллярных возмущений, скорость распространения которых выше, чем у гравитационных волн.*

Величина $Q_0=V_0\cdot q$ соответствует интенсивности распределенных по поверхности корпуса источников, моделирующих условие непротекания при движении корпуса корабля в безграничной жидкости.

$$Q = V_0 \cdot \frac{\partial f}{\partial x} \quad [\text{м/с}] \qquad (3)$$

где: $f(x,z)$ - ординаты корпуса.

Использование функции Q в интеграле (2.3) накладывает условие малости искажений формы свободной поверхности вблизи корпуса.

Под функцией G будем понимать потенциал некоторого единичного возмущения свободной поверхности от источника, лежащего на элементарной площадке, расположенной на поверхности корпуса ко-

рабля. Тогда функция $V_0\,q(\vec{r}_0)\cdot G(\vec{r}\vec{r}_0)$ будет определять потенциал течения, обусловленного влиянием источников, распределенных по всей поверхности корпуса, на свободную поверхность пересекаемой им тяжелой жидкости.

Аддитивное разложение потенциала [Костюков А.А., 1966] можно считать справедливым, если рассматриваются волновые движения, вызванные идущим кораблем, вдали от его корпуса, где потенциал φ_0 стремится к нулю и не оказывает влияния на динамические граничные условия на свободной поверхности. Соответственно влияние функции G должно быть настолько малым, чтобы ей можно было пренебречь при выполнении условий непротекания на поверхности корпуса в решении для потенциала φ_0.

Сформулируем исходные уравнения и граничные условия:

$$\Phi(x,y,z)=\Phi(\vec{r}) \qquad (2')$$

потенциал течения в системе координат, связанной с корпусом;

$$\left(\frac{\partial}{\partial\vec{r}}\frac{\partial\Phi}{\partial\vec{r}}\right)=0 \qquad (4)$$

уравнение Лапласа, как условие существования потенциала и достаточное условие для обеспечения неразрывности жидкости;

$$\vec{V}_n=\frac{\partial\varphi_0}{\partial\vec{n}}=0 \quad или \quad \left(\frac{\partial\varphi}{\partial\vec{r}}\cdot\vec{n}\right)=V_0\cdot\cos\left(\hat{n,x}\right) \qquad (5)$$

условие непротекания на поверхности корпуса для потенциала:

$$\Phi_0 = -V_0 x + \varphi_0;$$

$$\frac{\partial^2\varphi^*}{\partial x^2}+\frac{g}{V_0^2}\frac{\partial\varphi^*}{\partial z}=0, \quad при \;\; z=0 \qquad (6)$$

линейное динамическое граничное условие на свободной поверхности, которое получается из интеграла Эйлера по условию постоянства давления вдоль линии тока, лежащей на свободной поверхности;

$$\varsigma_w=\frac{V}{g}\frac{\partial\varphi^*}{\partial x}, \;\; при\; z=0 \qquad (7)$$

описание профиля волны. Следует из *(6);*

$$\begin{aligned} \varphi_0 &= 0 \quad : \quad x \to -\infty \\ \varphi_0 &= \varphi^* = 0 : \quad x \to +\infty \\ \varphi_0 &= \varphi^* = 0 : \quad z \to \infty \end{aligned} \qquad (8)$$

условия на бесконечности.

Волнообразующий потенциал G должен обеспечивать свойство симметрии относительно диаметральной плоскости корпуса, что может являться следствием определения распределенных источников Q*(x,z)* и считаться справедливым только для узкого корпуса. Такое же допущение делалось Мичеллом при выводе интеграла *(1)*.

Так же как Мичелл используем интенсивность распределенных источников в форме: $q \cong \frac{\partial f}{\partial x}$, а волнообразующий потенциал как:

$$\varphi^* = \frac{V_0}{4\pi} \cdot \int_\Omega qG \, d\Omega \qquad (2.3')$$

Граничные условия и интегральное преобразование Фурье

Предположим, что граничное условие на свободной поверхности удовлетворяется для каждого элемента свободной поверхности $d\Omega$, содержащего волнообразующий потенциал q·G. Это будет означать также удовлетворение условий малости возмущений свободной поверхности от единичного волнообразующего потенциала G, действующего с элементарной площадки $d\Omega$, в то время как суммарное влияние всего корпуса может быть достаточно большим.

Также как в справочнике по теории корабля под редакцией Я.И. Войткунского [1985] будем искать решение для G в форме отраженного через свободную поверхность стока, то есть в виде потенциала от зеркально отраженного источника с обратным знаком. Тогда функция G не имеет особенностей и непрерывна во всей области $z \geq 0$, кроме случая, когда $z=z_0=0$, то есть на свободной поверхности и когда волнообразующий источник находится на этой же поверхности.

Пусть: $$G = -\frac{1}{r'}; \qquad (9)$$

$$r' = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}\,.$$

Используем интегральное преобразование Фурье для функций трех переменных:

$$f(x,y,z)=\int\int\int_0^{\infty} A(P,Q,R)e^{P(x-x_0)+Q(y-y_0)+R(z-z_0)}dPdQdR \quad . \qquad (10)$$

Удовлетворяя уравнение Лапласа (4) для функции $f(\vec{r})$, получим:

$$R=i\sqrt{P^2+Q^2} \quad .$$

После введения обозначений: P =k· $cos\vartheta$; Q = k· $sin\vartheta$, возможен переход к представлению источника $1/\boldsymbol{r}$‘ в виде интеграла Фурье, зависящего от двух параметров:

$$G=-\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi}\int_0^{\infty} e^{k\cdot(-z-z_0+i\omega)}dkd\vartheta; \qquad (11)$$

$$\omega=(x-x_0)\cdot\cos\vartheta+(y-y_0)\cdot\sin\vartheta+(\sigma-kv_0\cos\vartheta)\cdot t.$$

В формуле *(11)* последнее слагаемое для ω взято из Дж.Ньюмена [1985], и отвечает за волны нестационарные по отношению к корпусу.

По физическому смыслу - экспонента под интегралом в формуле *(11)* описывает некие плоские волны в связанной с корпусом системе координат { *x,y,z* }, эти волны стационарны относительно движущего корпуса и ориентированы в направлении угла ϑ.

Пусть: $G^* = e^{k\cdot(-z-z_0-iw)}$. *(12)*

Подставляя G^* в динамическое граничное условие на свободной поверхности:

$$\frac{\partial^2 G^*}{\partial x^2}+\frac{g}{V_0^2}\frac{\partial G}{\partial z}=0 \quad , \; при\; z=0.$$

Тогда: $(ik\cos\vartheta)^2+k\cdot\frac{g}{V_0}=0$, u $k=\frac{g}{V_0^2\cos\vartheta}$ $[m^{-1}]$. *(13)*

После установления зависимости между параметрами k и ϑ в интеграле *(11)*, можно избавиться от одного параметра интегрирования. С этой целью применим интегрирование по частям:

$$\int_{-\pi}^{\pi}\int_0^{\infty} G^*\, d\quad kd\vartheta=\int_{-\pi}^{\pi}\left(G^*k-\int_{k=0}^{k=\infty}kd\,G^*\right)d\vartheta \quad .$$

При изменении порядка интегрирования во втором интеграле:

$$\int_{k=0}^{k=\infty}\int_{-\pi}^{\pi} k d\vartheta d\,\mathrm{G}^* = \int_{k=0}^{k=\infty}\int_{-\pi}^{\pi} \frac{g d\vartheta}{V_0^2\cos^2\vartheta} d\,\mathrm{G}^*,$$

внутренний интеграл, по параметру ϑ обращается в нуль:

$$\int_{k=0}^{k=\infty}\int_{-\pi}^{\pi} \frac{g d\vartheta}{V_0^2\cos^2\vartheta} d\,\mathrm{G}^* = \frac{g}{V_0^2}\tan\vartheta\Big|_{-\pi}^{\pi} = 0.$$

Тогда волнообразующий потенциал G может преобразуется к следующему виду:

$$\mathrm{G} = \int_{-\pi}^{\pi} \mathrm{G}^*\, k d\vartheta = -\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} k\cdot e^{k\cdot(-z-z_0+i\omega)} d\vartheta,\ \ при\ z=0, \qquad (14)$$

где: $k = \dfrac{g}{V_0^2\cos^2\vartheta}$; $\quad \omega = (x-x_0)\cdot\cos\vartheta + (y-y_0)\cdot\sin\vartheta + (\sigma - kV_0\cdot\cos\vartheta)\cdot t$.

Описание единичного волнообразующего источника

Воспользуемся описанием профиля корабельной волны *(7)* для получения общей волновой картины от движущегося источника, который описывается только что полученным интегралом *(14)*:

$$r_w = k\frac{V_0}{2\pi\cdot g}\frac{\partial\,\mathrm{G}^*}{\partial\,x} = \frac{1}{2\pi V_0\cos^2\vartheta}\frac{\partial\,\mathrm{G}^*}{\partial\,x}; \qquad (15)$$

$$\mathrm{r}_w = \frac{ig}{2\pi\ \ V_0^3\cos^3\vartheta}\mathrm{e}^{k\cdot(-z_0+i\omega)}. \qquad (16)$$

Аппликата свободной поверхности для заданной частоты формы:

$$\zeta_w(\vartheta,x,y) = \mathrm{Re}\left(\vec{\mathrm{r}}_w\right) = \frac{g}{2\pi V_0^3\cos^3\vartheta}\mathrm{e}^{-kz_0}\sin(k\omega). \qquad (17)$$

Аппликата волновой поверхности от возмущения, вызванного элементарной площадкой судовой обшивки:

$$r_w = i\frac{g}{2\pi V_0^3}\int_{-\pi}^{\pi}\mathrm{e}^{k(-z_0+i\omega)}\frac{d\vartheta}{\cos^3\vartheta};$$

$$\zeta_w = \frac{g}{2\pi V_0^3}\int_{-\pi}^{\pi}\mathrm{e}^{-kz_0}\sin(k\omega)\frac{d\vartheta}{\cos^3\vartheta}.$$

Теперь необходимо воспользоваться требованием стационарности картины волнообразования относительно системы координат, связанной с корпусом корабля.

1. Если σ связана с *k* дисперсионным соотношением:

$$\sigma^2 = gk\,;\quad \sigma = \frac{g}{V} = \frac{g}{V_0 \cos\vartheta}\quad , \qquad (18)$$

то в функции G^* пропадает величина: $e^{\left(i\frac{\sigma}{k} - iV_0\cos\vartheta\right)\cdot t}$.

2. Скорость движения излучаемой корпусом волны не может превышать скорости хода корабля: $V \le V_0$.

Тогда, если $V=V_0\cos\vartheta$, что следует из (13), то: $V=0$ соответствует $\vartheta = \pm\pi/2$; $V=V_0$ – соответствует $\vartheta = 0$ или $\vartheta = \pm\pi$.

Геометрическое толкование уравнения *(17)* изложено в книге Г.Е. Павленко [1952], где показывается система трехмерных свободных волн, распространяющихся с фазовой скоростью $V=V_0\cos\vartheta$ в направлении угла $\angle\vartheta$.

Исходя из анализа рис. 8, будем считать возможным искусственное ограничение интервала интегрирования в определении волнообразующего потенциала *(14)*, до: $\angle\vartheta \in]-\pi/2 \div -\pi]$, тогда:

$$G = \frac{1}{\lambda}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} k\cdot e^{k\cdot(-z-z_0+i\omega)}\, d\vartheta\,, \qquad (14')$$

где: $\lambda = \frac{2\pi}{k}, k = \frac{g}{V_0^2\cos^2\vartheta}, \omega = (x-x_0)\cdot\cos\vartheta + (y-y_0)\cdot\sin\vartheta$.

Таким образом, из рассмотрения исключаются свободные волны, которые допускаются динамическим граничным условием *(6)*. Это именно те волны, которые можно интерпретировать как внешние и поглощаемые корпусом корабля при взаимодействии с морским волнением. Если корпус корабля способен поглощать внешние волны, то их энергия уходит на усиление качки и рыскания. Из указанных логических заключений следует вывод: *что, если форма корпуса корабля плохо оптимизирована по волнообразованию на всех диапазонах скоростей хода, то этот корабль обладает также и плохой мореходностью в условиях реального морского волнения.*

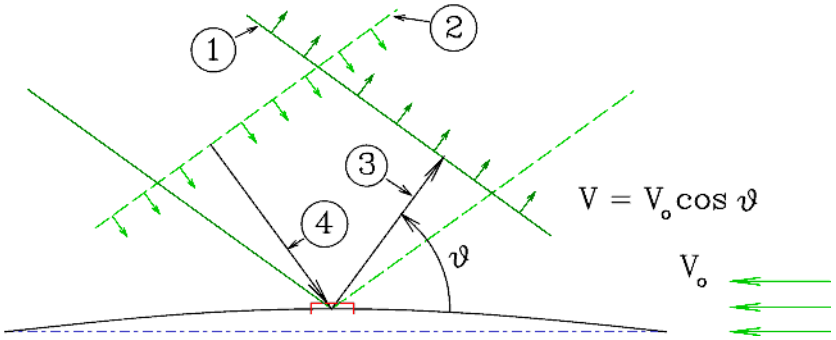


Рис. 9. Полная схема отраженного излучения корабельных волн и положение их фронтов. *(1) фронт расходящейся волны (излучаемой), движущейся со скоростью* $V=V_0\cos\vartheta$*; (2) положение фронта волны, приближающейся к корпусу корабля, которая также является стационарной в связанной системе координат, но не учитывается в наших динамических уравнениях; (3) направление излучения расходящейся корабельной волны; (4) направление подхода как бы внешней волны, у которой угол* $\angle\vartheta$ *лежит в диапазоне:* $\angle\vartheta\in]-\pi/2 \div -\pi]$ *или* $\angle\vartheta\in[\pi \div \pi/2[$.

Описание корабельного волнообразования

По физическому смыслу функция:

$$G^{*}\frac{k}{2\pi}=\frac{1}{\lambda}e^{k(-z-z_0+i\omega)}=G^{**} \qquad (19)$$

определяет потенциал плоской волны, которую мы можем наблюдать на некотором удалении от единичного источника. Так как амплитудным множителем перед G^{**} стоит малая величина $d\Omega$, то для подынтегральной функции эти волны можно считать малыми.

$$\varphi^{*}(\vartheta)=\frac{V_0}{4\pi\ \lambda}\int_{\Omega}q(x,z)\cdot e^{k(-z-z_0+i\omega)}\,d\Omega, \qquad (20)$$

$$\varphi^{*}=\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\varphi^{*}(\vartheta)d\vartheta\ .$$

Потенциал $\varphi^{*}(\vartheta)$ описывает волны конечной амплитуды, его получения связано с интегрированием по всей поверхности корпуса *(20)*.

Рассмотрим механизм сложения корабельных волн, стационарных относительно движущегося корабля и имеющих заданную частоту формы.

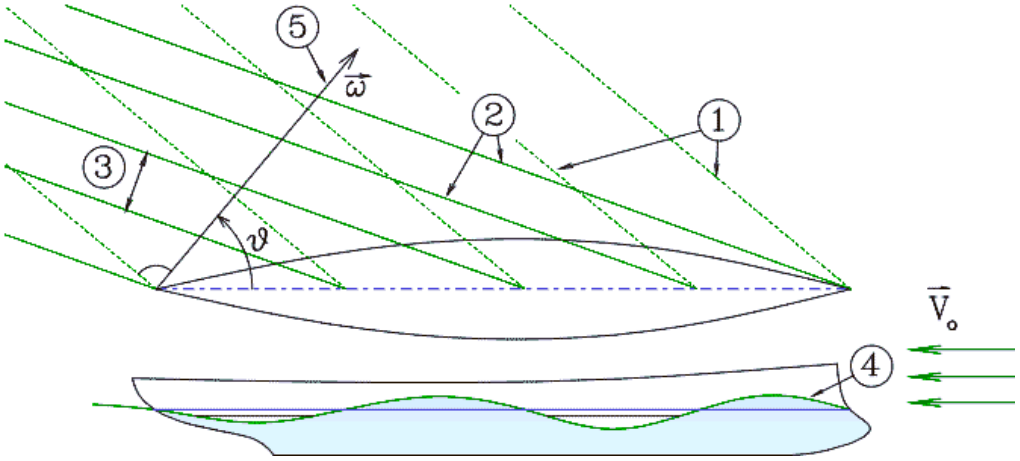


Рис. 10. Две системы расходящихся от корпуса корабельных волн: 1-я имеет фазовые характеристики, с частотой формы k=f(ϑ); 2-я система волн формируется при их преобразовании к групповой структуре*. (1) Положение фронтов волн, имеющих фазовую структуру и движущихся со скоростью $V=V_0\cos\vartheta$; (2) Положение фронтов расходящейся системы корабельных волн конечной амплитуды, полученных сложением элементарных волн от всех участков обшивки корпуса и распространяющихся с групповой скоростью для пакетов волн на глубокой воде; (3) Выделенные полосы на поверхности жидкости, в которых существуют пакеты волн с данной фазовой частотой формы; (4) Отметка волновой поверхности на диаметральной плоскости корпуса корабля; (5) Направление, по которому наблюдается распространение фазовых профилей волн.*

Для получения реальной картины корабельного волнообразования необходимо учитывать, что излучаемые корпусом корабля волны объединяются в пакеты, которые движутся с групповой скоростью $V_g={}^1\!/_2 V$. При восстановлении волнового поля необходимо производить сложение пакетов волн во всем спектре частот:

$$k=\frac{g}{V_0^2\cos^2\vartheta} \qquad : \qquad \vartheta\in\left[0\div\frac{\pi}{2}\right].$$

Рассмотрим поле скоростей в плоскости распространения фазовых волн. Пусть излучение ведется только с одной площадки на поверхности корпуса, тогда:

$$V_z=V_0\,\mathrm{q}\cdot\mathrm{Re}\left(\frac{\partial\,\mathrm{G}^{**}}{\partial\ \ \mathrm{z}}\right)=V_0\,\mathrm{q}\cdot\frac{k}{\lambda}e^{-k(z+z_0)}\cos(k\omega); \qquad (21.1)$$

$$V_\omega=V_0\,\mathrm{q}\cdot\mathrm{Re}\left(\frac{\partial\,\mathrm{G}^{**}}{\partial\ \ \omega}\right)=V_0\,\mathrm{q}\cdot\frac{k}{\lambda}e^{-k(z+z_0)}\sin(k\omega). \qquad (21.2)$$

Аналогичный результат будет получен дифференцированием по времени положения частиц жидкости заданных формулами *(15) и (16):*

$$\vec{V}(\vartheta)=\frac{\partial \vec{r}_w}{\partial \vec{r}}\frac{\partial \vec{r}}{\partial t}\cos\vartheta=\frac{\partial r_w}{\partial \vec{r}}V_0\cos\vartheta.^{31}$$

Здесь учтено, что выражение *(15)* определяет отклонение частиц жидкости от невозмущенного состояния, в проекции на плоскость $\{x:z\}$, в системе координат, связанной с подвижным корпусом.

Как известно [Шебалов, 1984, Егоров, 1974], формулы для описания траекторий частиц жидкости *(21.1,21.2),* являются также определениями для плоских трохоидальных волн конечной амплитуды, которые называют волнами Герстнера. Это справедливо, если считать V как локальную скорость частицы жидкости в Лагранжевом представлении течения.

Основные свойства волнового поля

Рассмотрим основные свойства корабельного волнообразования на основе полученного поля скорости.

1. Частицы жидкости участвуют в движении по круговым траекториям [Войткунский Я.И., 1982] со скоростью, зависящей от аппликаты z:

$$V_p=V_0\,\mathrm{q}\frac{k}{\lambda}e^{-k(z+z_0)}. \qquad (22.1)$$

Угловая скорость: $\omega=\sigma=\dfrac{g}{V_0\cos\vartheta}$.

Локальный радиус траектории: $r_1=\dfrac{V_p}{\sigma}=V_0\cdot V\cdot \mathrm{q}\cdot\dfrac{k}{g\lambda}e^{-k(z+z_0)}$ *(22.2)*

2. Пользуясь условием стационарности рассматриваемого потока жидкости, учтем, что линии тока и траектории частиц совпадают. При переходе же к Лагранжевым координатам, где всегда рассматривают-

---

[31] *В соответствии с принятыми обозначениями*: $\dfrac{\partial r_w}{\partial \vec{r}}\equiv\mathrm{grad}(r_w);\left[\dfrac{\partial \vec{V}}{\partial \vec{r}}\right]=\mathrm{rot}(\vec{V})$.

ся траектории частиц жидкости, ранее полученные уравнения *(21)* будут относиться также и к трохоидальным волнам Герстнера.

Подмена кинематической системы отсчета никак не отражается на использовании предположений о линейности волновых свойств потока, по крайней мере в пределах малых частиц жидкости, а сохраняя неизменным дисперсионное соотношение $\sigma^2 = g \cdot k$, соответственно сохранится и большинство выводов из линейной теории волн *(волн на свободной поверхности под действием сил гравитационной природы)*. Как показано в работе А.Н. Шебалова [1984], такое трактование поля скорости *(21)* делает его вихревым:

$$\left\| \left[\frac{\partial \quad \vec{V}}{\partial \quad \vec{r}} \right] \right\| = -\frac{2\sigma \quad k^2 \mathrm{R}^2 e^{2kz_0'}}{1 - k^2 \mathrm{R}^2 e^{2kz_0'}}; \quad \mathrm{R} = V_0 \cdot V \cdot \mathrm{q} \cdot \frac{k}{g\lambda}.$$

Знак завихренности говорит о том, что в случае вязкой жидкости волны конечной амплитуды (волны Герстнера) будут угасать со скоростью, пропорциональной квадрату амплитуды.

Для получения волновой поверхности и поиска максимальной амплитуды волны в функции от ее «частоты формы» запишем выражение для радиусов траекторий частиц жидкости *(16)* в следующем виде: $\vec{r}_w = \frac{1}{2} A \cdot e^{-k(z+z_0)}$. В соответствии с трохоидальной теорией, локальная траектория частиц жидкости описывается дугой окружности с радиусом r_w, зависящим от текущей аппликаты: z, для данной частицы жидкости z_w и от амплитуды волны на поверхности: $\mathrm{A} = \frac{2}{\lambda} \frac{\mathrm{q}}{\cos\vartheta}$. Скорость движения элементарных частиц определяется через произведение частоты колебаний и радиуса дуги траектории:

$$V_r = \sigma \cdot r = V_0 \, \mathrm{q} \frac{k}{\lambda} e^{-k(z+z_0)} = \frac{\mathrm{q}}{V} \frac{A}{2} e^{-k(z+z_0)}.$$

Скорость движения частиц жидкости возрастает с уменьшением глубины z. На вершине волны эти частицы перемещаются с максимальной скоростью в направлении движения ее гребня.

Допустим, что скорость частиц жидкости не должна превышать скорости распространения корабельной волны, так как это является

условием разрушения волнового гребня. В этом случае максимальная скорость $V=V_r$:

$$\frac{\mathrm{q}}{V_0^2}\frac{\mathrm{A}}{2}e^{-kz}=1=\frac{k\,\mathrm{A}}{2}e^{-kz}.$$

В предельном случае трохоидальная теория, путем численного (*приближенного*) решения полученного соотношения, дает константу: $\mathrm{A}\cdot k\approx 1.134$, при: $z = \mathrm{A}/_2$, или с учетом снижения амплитуды на подошве волны получается: $\boldsymbol{\lambda/h\approx 8.38}$**,** что соответствует прогрессивной волне с интенсивно разрушающимся гребнем.

Полученное соотношение определяет весьма важное свойство волн Герстнера, как реальных вихревых волн конечной амплитуды, и должно быть использовано при физической интерпретации характера волнообразования от всего корпуса корабля.

Формула Мичелла для волнового сопротивления

При построении формулы для волнового сопротивления корабля на основе линейной теории волн, которая подразумевает существование потенциалов *(2')*: $\Phi = -V_0x + \varphi_0 + \varphi^*$, будем пользоваться потенциалом G^{**} *(19),* который описывает малые возмущения, вносимые в поток с элементарной площадки на поверхности корпуса: $d\Omega$**.** Основываясь на энергетических зависимостях линейной теории волн, определим энергию, распределенную по взволнованной поверхности моря, которая приходится на образование одной волны с длиной λ:

$$\mathrm{E}=\frac{1}{2}\rho\quad g\,\mathrm{A}^2\,\lambda=\pi\rho V_0^2\,\mathrm{A}^2\cos^2\vartheta,\quad [\text{ Н/м }] \qquad (23)$$

Далее учтем, что скорость переноса энергии определяется через групповую скорость пакета, состоящего из фазовых волн: $V_g=\frac{1}{2}V=\frac{1}{2}V_0\cos\vartheta$ (для глубокой воды). Излучение корабельных волн ведется в диапазоне: $\lambda\in\left[0\div\Lambda=2\pi\frac{V_0^2}{0}\right]$.

Из условия стационарности картины волнообразования относительно движущегося корабля следует, что фазовые профили всех излучаемых волн отображаются на диаметральную плоскость корпуса как волны одинаковой длины. Это означает также, что пакеты волн любой частоты содержат одинаковое количество периодов фазовых волн, в точности укладывающихся на волнообразующую длину корпуса.



Рис. 11. Картина корабельного волнообразования *обладает свойством неподвижности относительно идущего с постоянной скоростью корабля, при этом поперечные волны в следе корабля обладают строгой регулярностью, а ограничивающие их расходящиеся волны имеют ярко выраженную групповую структуру с обрушающимися гребнями и частично стоячими фронтами одиночных волн.*

Мощность, затрачиваемая кораблем на образование волн, излучаемых в направлении $\angle\vartheta$, выражается следующим уравнением:

$$\mathrm{P}(\vartheta)=\frac{\pi}{2}\rho V_0^3\,\mathrm{A}^3\cos^3\vartheta\ :\qquad(\times\delta\quad\vartheta) \tag{24}$$

Волновое сопротивление от всего спектра корабельных волн:

$$\mathrm{R}_x=\frac{\pi}{2}\rho V_0^2\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\mathrm{A}^2(\vartheta)\cos^3\vartheta d\vartheta\,. \tag{25}$$

Полученный интеграл называют формулой ***Хавелока*** [Ньюмен, 1985]. Амплитудную функцию $\mathrm{A}(\vartheta)$ можно получить из линейного граничного условия на свободной поверхности жидкости *(7)*, применяя его к выражению для потенциала от всего корпуса *(20)*, подобно тому, как это делалось при получении формул для линий тока и аппликат частиц жидкости *(16)* и *(17)*.

$$r_w=\frac{V_0}{g}\frac{\partial\quad\varphi^*(\vartheta)}{\partial x}: \tag{7}\Rightarrow(20)$$

$$\left.\begin{array}{l}\zeta_w(\vartheta)=\mathrm{Re}(r_w)\\ \mathrm{A}(\vartheta)=|r_w|\end{array}\right\}: \qquad (16)\Rightarrow(17)$$

$$r_w(\vartheta)=\frac{i\ g}{2\pi V_0^2}\int_\Omega \mathrm{q}\cdot \mathrm{e}^{k(-z_0+i\omega)}\cdot\frac{d\ \Omega}{\cos^3\vartheta} \qquad (26)$$

$$\mathrm{A}(\vartheta)=\frac{g}{2\pi V_0^2\cos^3\vartheta}\left|\int_\Omega \mathrm{q}\cdot \mathrm{e}^{k(-z_0+i\omega)}\,d\Omega\right| \qquad (27)$$

После подстановки амплитудной функции *(27)* в формулу Хавелока *(25)* может быть получен аналог интеграла Мичелла, который по сути является точной копией выражений, связанных с именем Н .Е.Кочина.

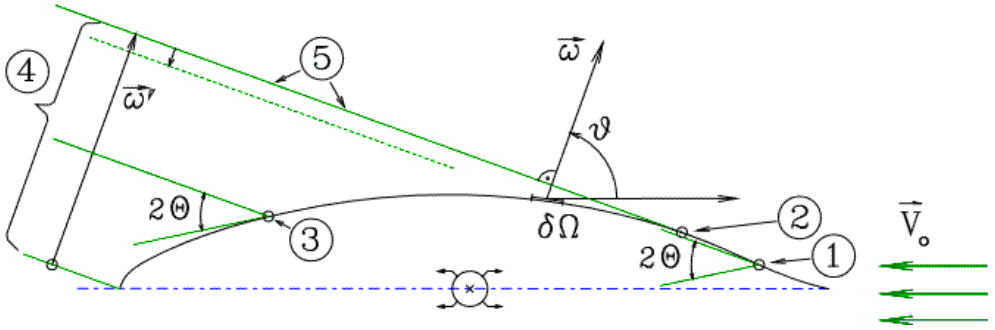
$$\mathrm{R}_x=\frac{\rho\ \ g^2}{4\pi V_0^2}\int_0^{\frac{\pi}{2}}\left|\int_\Omega \mathrm{q}e^{k(-z_0+i\omega_0)}d\ \ \Omega\right|^2\frac{d\vartheta}{\cos^3\vartheta}, \qquad (28)$$

$\mathrm{q}(x,z)\approx\frac{\partial f(x,z)}{\partial\ x}$; $\omega_0 = x_0\ cos\vartheta$ (по Мичеллу): $\omega_0 = x_0\ cos\vartheta + y_0\ sin\vartheta$ (по Кочину).

Переходя к физической и геометрической интерпретации полученных формул, сделаем повторение выкладок для получения амплитудной зависимости *(27)*, но уже с помощью геометрических построений на основе потенциала G^{**}. Это позволит выявить области с нарушениями физических законов реального волнообразования, которые допускаются в случае прямого интегрирования формулы для вычисления волнового сопротивления корабля *(28)*.

Используем описание волнового поля в связанной с корпусом системе координат *(16)*: $\mathrm{r}_w=\frac{ig}{2\pi V_0^3\cos^3\vartheta}e^{k\cdot(-z-z_0+i\omega)}\cdot\mathrm{q}\cdot V_0$. Амплитуда волны на свободной поверхности жидкости ($z=0$), полученная в результате излучения с единичной площадки на обшивке корпуса, представляется как:

$$\begin{array}{l}A(\vartheta,x_0,y_0)=V_0\ \mathrm{q}\cdot|\mathrm{r}_w|:d\Omega=1,\\ A(\vartheta,x_0,y_0)=\frac{\mathrm{q}(x_0,y_0)}{\lambda\cos\vartheta}e^{-kz}.\end{array} \qquad (29)$$



$d\Omega = dx_0 dy_0 \sqrt{1 + y_X^2 + y_Z^2}$; $\Theta = \frac{\pi}{2} - \vartheta$ - *угол фронта.*[32]

Рис. 12. Распространение и интерференция фазовых волн. *(1) Точка, в которой невозможно излучение носовой расходящейся волны с данной фазовой частотой; (2) Точка, в которой корабельная волна отрывается от корпуса, до этой точки волны заданной частоты складываются в гребень; (3) Точка, в которой нарушается условие отхода кормовой расходящейся волны; (4) Линия, задающая направление распространения плоских фазовых волн, вдоль которой происходит интерференция этих волновых движений; (5) Фронт расходящейся корабельной волны с заданной фазовой частотой*

Каждый элемент обшивки корпуса создает на свободной поверхности жидкости приращение амплитуды корабельной волны, фронт которой простирается вдоль линии, обозначенной на рис. 12 символом: ⑤[33], при этом фаза волны не меняется вдоль фронта, а амплитуда вычисляется по формуле *(29)*. Поставим точки на линии $\vec{\omega}$' : ④ в соответствие с точками на поверхности корпуса:

$$\vec{\omega}' = x_0 \cos\vartheta + y_0 \sin\vartheta, \qquad (30)$$

где учтено, что вектор $\vec{\omega}$' может перемещаться вдоль фронта фазовой волны, а в формуле *(30)* он проведен из начала координат: (*x=0*, *y=0*).

Тогда, записывая результирующую амплитудную функцию для фазовых волн, как результат их интерференции на линии $\vec{\omega}$':

$$A(\vartheta, z_0) = \left| \int_{\omega ©} A(\vartheta, x_0, y_0) \cdot e^{ik\omega'} d\omega' \right| . \qquad (31)$$

Интегрирование вдоль вектора $\vec{\omega}$' усложняется тем, что направление $\vec{\omega}$' задается фазовым углом ϑ. Воспользуемся тем свой-

---

[32] *Подробному толкованию точек* ①,② *и* ③, *а также критического угла* 2Θ, *посвящена следующая глава.*

[33] *Цифры в кружочках, встречающиеся в тексте, означают позиции на рисунках*

ством, что из условия стационарности картины волнообразования любая система фазовых волн единообразно проектируется на направление движения корабля. Можно изменить параметр интегрирования $d\omega$ на dx, и при этом пересчет ω' под экспонентой в формуле *(30)*, будет правильно определять фазу волны в интерференционном интеграле *(31)*.

$$A(\vartheta, z_0) = \frac{-e^{-kz_0}}{\lambda \cos\vartheta} \left| \int_{x_0} q(x_0, z_0) e^{ik\omega'} dx \right|. \qquad (32)$$

Амплитудная функция от всего корпуса:

$$A(\vartheta) = \frac{1}{\lambda \cos\vartheta} \left| \iint_{\Omega} q(x_0 y_0) e^{k(-z_0 + i\omega')} d\Omega \right| \qquad (33)$$

$$\omega' = x_0 \cos\vartheta + y_0 \sin\vartheta; \quad d\Omega = \sqrt{1 + y_X^2 + y_Z^2}\, dxdz$$

Из геометрического построения формулы *(33)* можно отметить отсутствие корректности при включении в интерференцию волн, излучаемых с участка корпуса от форштевня до точки ② и от точки ③ до ахтерштевня (*по рис.11*). Получение же аналогичной формулы из волнообразующего потенциала: $\varphi^*(\vartheta)$, ввиду формальности *преобразований (7) ⇒ (20) ⇒ (26) ⇒ (27)*, полностью исключает этот вопрос из рассмотрения.

Для уточнения расчетов волнового сопротивления корабля, которые будут выполняться с использованием уравнений, полученных на основе линейной теории волн, необходимо продолжить геометрическую и физическую интерпретацию формул для волнового сопротивления корабля *(28)* и корабельного волнообразования *(33)*.

Вычислительная модель на основе интеграла Мичелла

Для решения этой задачи все математические выкладки выполнены в физически значимых переменных, допускающих размерное представление расчетных величин, и соответственно физическое и геометрическое понимание сути всех вычислительных объектов и операций. В результате подынтегральное выражение было определено с помощью амплитуды корабельной волны, источники излучения которой локализуется до элементарных участков судовой обшивки:

$$R_X = \frac{\rho \quad g^2}{4\pi \cdot V_0^2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left| \int_\Omega q(x_0, z_0) e^{k\cdot(-z_0 + i\omega_0)} d\Omega \right|^2 \frac{d\vartheta}{\cos^3 \vartheta}; \qquad (28')$$

или: $$R_X = \frac{\pi}{2} \rho V_0^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} A^2(\vartheta) \cdot \cos^3 \vartheta d\vartheta; \qquad (25')$$

и: $$A(\vartheta) = \frac{1}{\lambda \cos\vartheta} \left| \int_\Omega q(x_0, y_0) \cdot e^{k\cdot(-z_0 + i\omega_0)} d\Omega \right|, \qquad (33')$$

где: $q \cong \frac{\partial f}{\partial x}$; $\omega = x_0 \cos\vartheta + y_0 \sin\vartheta$; $k = \frac{g}{V_0^2 \cos^2 \vartheta}$; $\lambda \in \left[0 \div \Lambda = 2\pi \frac{V_0^2}{g} \right]$.

Теперь интеграл Мичелла описывает трансформацию падающих на корпус волн в диапазоне длин λ от 0 до Λ, при этом волнообразование рассматривается как своеобразная деформация внешних морских волн в процессе их отражения от корпуса. Принятие такого объяснения корабельного волнообразования соответствует выводу о том, что минимизация волнового сопротивления на всех скоростях хода одновременно минимизирует силовое воздействие на корабль со стороны штормового волнения.

Непосредственное использование для расчетов волнового сопротивления корабля формул, полученных в предыдущей главе, сопряжено с рядом трудностей, в том числе связанных с их формальными недостатками. При построении численных решений очень важно учитывать и по возможности корректировать недостатки интегралов Мичелла, обусловленные использованием линейной теории волн, что реально, исходя из анализа и геометрической интерпретации картины волнообразования, а также привлечением к эмпирическим аппроксимациям свойств волн Герстнера как реальных морских волн конечной амплитуды.

При получении формулы для волнового сопротивления *(25)* использовалась линейная теория волн, на основе которой можно делать выводы для гравитационных волн заведомо малой амплитуды. Имеется в виду случай, когда амплитуда существенно мала по отношению к длине волны, что формально позволяет не разделять траектории и линии тока, которые, в том случае, сводятся к простым гармоническим функциями вида: $e^{k\cdot(-z_o + i\omega_o)}$.

Оценка энергии волнообразования:

$$E = \rho \cdot g \cdot A^2 / 2. \qquad (34)$$

В основу энергетической зависимости *(34)* закладывалось допущение о том, что с элементарной площадки на поверхности корпуса корабля излучаются “малые волны”. Но амплитудная функция $A(\vartheta)$ *(33)* описывает волнообразование от всего корпуса, т.е. $A(\vartheta)$ определяет реальные корабельные волны с большой амплитудой, и более того при $\vartheta \to \pi/2 \Rightarrow A \to \infty$.

Второй способ получения амплитудной функции основывается на геометрических построениях с целью получения общей картины волнообразования, где используется суммирование фазовых волн и их групповых пакетов. Фазовые волны образуют систему расходящихся корабельных волн, в которой скорость убегания волн от корпуса зависит от длины волны, определяемой углом ϑ.

Справедливость формальных математических преобразований, при получении амплитудных зависимостей $A(\vartheta)$, может быть подвергнута сомнению для участков корпуса вблизи оконечностей, где скорость поперечных перемещений жидкости, вызванная поступательным движением корпуса, превышает скорость распространения корабельных волн с высокой частотой ϑ. В этой области в носовой оконечности корпуса происходит образование разрушающегося гребня, который нельзя описать с помощью волновых уравнений. Такие участки корабельного корпуса характеризуются активной зависимостью волнообразующих источников от поля потенциального обтекания корпуса и некорректностью применения аддитивного разложение типа: $\Phi = -V_0 x + \varphi_0 + \varphi^*$.

В то же время в рассуждениях неявно применялось правило отражения круговой волны от единичного источника, расположенного на поверхности корпуса. Для формирования корабельной волны, излучаемой всем корпусом корабля, использовалось простое интегрирование (сложение) всех источников, распределенных по поверхности корпуса. Но к потокам вблизи корпуса судна нельзя применять анализ волнообразования в потенциалах, так как здесь потенциал обтекания

корпуса φ_o не удовлетворяет динамическому граничному условию на поверхности взволнованной жидкости, с заведомо большой амплитудой волн, а волновой потенциал φ^* соответственно не участвует в выполнении условий непротекания на поверхности корпуса.

Для получения адекватной вычислительной модели корабельного волнообразования необходимо отказаться от применения аддитивного разложения и соответственно не попытаться в точности удовлетворить все граничные условия вблизи корпуса. Очевидно, что в настоящее время невозможно построить строгого решения с помощью потенциалов или математического аппарата скалярных функций векторного аргумента, а соответствующие вычислительные модели векторных полей векторного аргумента еще только разрабатываются.

Вблизи корпуса движущегося корабля происходит интенсивное вихреобразование, в процессе которого формируются свободные трохоидальные волны конечной амплитуды. Нельзя ли с помощью вихревой энергетики попытаться определить явления, связанные с разрушением гребней волн в непосредственной близости от корпуса, а также в районах пересечения гребней расходящейся и поперечной системы корабельных волн?

Для практической интерпретации вычислений по формулам *(25)* и *(33)* воспользуемся геометрическими свойствами трохоидальных волн Герстнера с целью поиска системы эвристических правил для пересчета характеристик высокочастотных волн: $k = \dfrac{g}{V_0^2 \cos^2 \vartheta}$, то есть тех волн, которые не могут оторваться от корпуса.

Условие образования свободных волн

Волна не может отойти от поверхности корпуса, если ее скорость:

$$V \le V_0 \cdot \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| \cdot \frac{1}{\cos \vartheta} \approx V_0 \cdot |q| \cdot \frac{1}{\cos \vartheta} \qquad (35)$$

меньше, чем скорость движения элемента обшивки корпуса в том же (поперечном) направлении, относительно неподвижной жидкости.

Если корабельная волна не образует фронта плоской поверхностной волны, то она не может быть представлена с помощью потенциала G^{**} *(19)*, теоретически только такая волна может перемещаться на большие расстояния без угасания. Для объяснения условия *(35)* снова воспользуемся геометрическими построениями для волн, образованных потенциалом G^{**}, задающим излучение с единичной площадки на поверхности корпуса.

$$G^{**} = G^{**}(\vartheta, x_0, y_0, z_0) = \frac{V_0\, q}{\lambda} e^{k\cdot(-z+z_0+i\omega)}. \qquad (36)$$

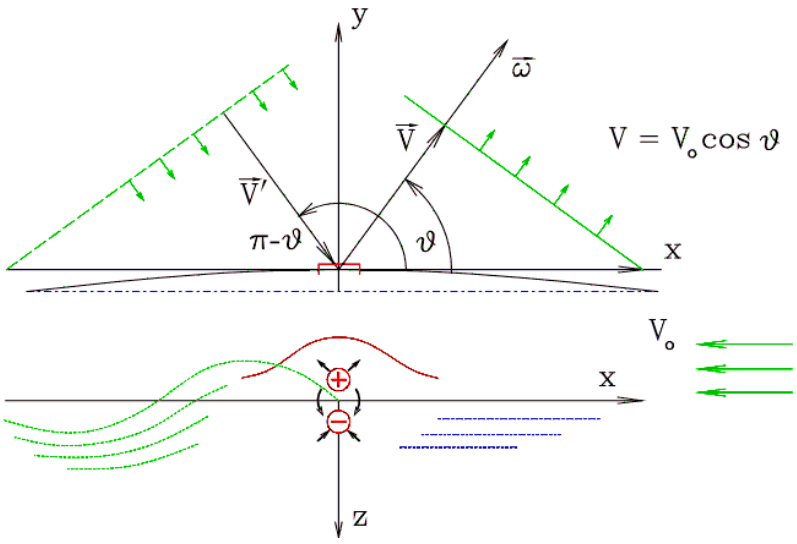


Рис. 13. Действие волнообразующего потенциала G^{**} подобно диполю, который подбрасывает жидкость вверх.

Величина $V_0 \cdot q = Q(x_0, y_0, z_0)$ определяет амплитуду поверхностных волн, поэтому можно положить $V_0 q = 1$, так как такое упрощение не нарушает волновых свойств потенциала G^{**} как единичного волнообразующего источника.

$$G^{**} = \frac{1}{\lambda} e^{k\cdot(-z+z_0+i\omega)} = -\frac{2\pi}{r'}, \qquad (37)$$

$$r' = \sqrt{(z-z_0)^2 + (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}.$$

Рассмотрим действие потенциала G^{**} как ориентированного вверх диполя, который образован стоком и источником в точках $\{z_0\}$ и $\{z\}$, соответственно. Пусть этот диполь будет расположен вблизи точки $\{ z \approx z_0 = 0, x = x_0, y = y_0 \}$.

G^{**} стремится к образованию на свободной поверхности жидкости кругового купола, по горизонтальным касательным к которому располагаются фронты излучаемых волн. Фазовая скорость движения свободных корабельных волн определяется как: $V = V_0 \cos\vartheta$, что соответствует движению вдоль нормали к образующей диполь окружности, но с учетом того, что диполь двигается навстречу потоку вблизи свободной поверхности жидкости. Кормовая часть дипольной окружности соответствует интервалу фазовых углов $\vartheta \in]\pm\pi/2 : \pm\pi]$ и образует систему волн, где каждую волну можно представлять как проходящую на противоположный борт сквозь диаметральную плоскость. Последнее можно определить также с помощью понятия отражаемой от корпуса системы внешних волн.

Все сказанное выше можно рассматривать как систему аналитических описаний, относящихся «к тонкому судну Мичелла», и интерпретировать как волнообразование, измеренное на достаточно большом удалении от корпуса корабля. Реальная картина течения и волнообразования вблизи корпуса существенно сложнее, однако теория Мичелла допускает применение эмпирических или специальных асимптотических численных методов, которые могут позволить инженерные решения как для уточненного расчета волнового сопротивления, так и для построения картины корабельного волнообразования и соответственно оптимизации формы корпуса по критерию минимизации энергии излучаемых (трансформируемых) корабельных волн на различных скоростях хода.

По исходной постановке задачи ($\Phi = -V_0 x + \varphi_0 + \varphi^*$) потенциал φ^* действует в потоке, неискаженном влиянием корпуса, где угол падающей внешней волны всегда равен углу отраженной свободной волны. Соответственно первый уровень упрощения задачи должен быть связан с тем, что не учитывается влияние угла входа ватерлиний на направление распространения расходящихся волн. Пренебрегается также эффектом перераспределения амплитуд по направлению излучения корабельных волн (по угловому параметру ϑ.), обусловленным влиянием реальной ширины корпуса судна.

Тогда: $$A(\vartheta)=\left|\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} A(\vartheta,x_0)e^{ik\omega_0}dx_0\right|, \qquad (38)$$

если: $$V_0\cos^2\vartheta\rangle\left|V_0\frac{\partial f}{\partial x}\right|\approx|V_0\,\mathrm{q}|,$$

а также: $$A(\vartheta)=\left|\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} A(\vartheta,x_0)e^{-k\omega_0^*}dx_0^*\right|, \qquad (39)$$

в том случае, если: $V_0\cos^2\vartheta < |V_0\mathrm{q}|$. Здесь x^* отсчитывается по потоку от форштевня до точки **А**, в которой происходит отрыв расходящейся волны от корпуса, а также от аналогичной точки в корме **В** и до ахтерштевня.

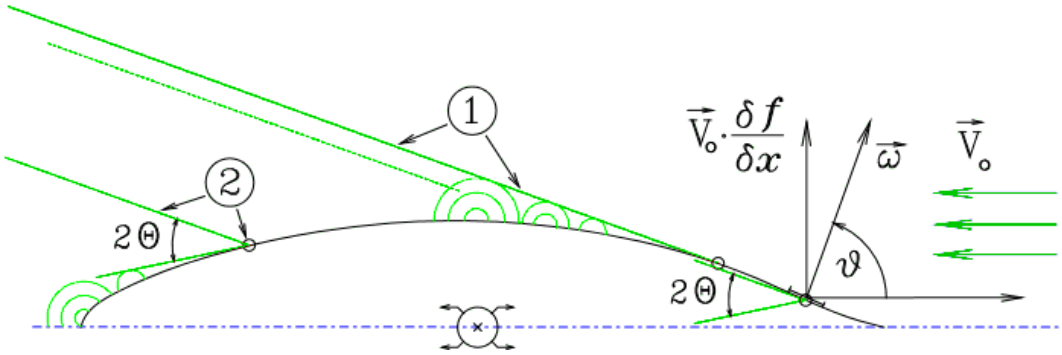


Рис. 14. Геометрическая интерпретация условий формирования фронта расходящейся волны.*(1) Условием формирования корабельной волны является сложение амплитуд волновых импульсов, излучаемых одновременно из различных точек обшивки корабельного корпуса; (2) Волна с заданной «частотой формы» не может быть сформирована, если касательная к поверхности корпуса не попадает в сектор 2·Θ.*

Искусственно сконструированный интеграл *(39)* производит сложение волн, образующихся в районе оконечностей, в отличие от исходного интеграла *(38),* который определяет процесс интерференции корабельных волн, образующихся вдоль корпуса. Экспонента под интегралом учитывает, что амплитуда, являющаяся функцией от фазового угла или частоты формы ($A(\vartheta)=A^*(k)$), не может расти до бесконечности, и по мере возрастания амплитуды уменьшается скорость ее роста.

Вывод формулы *(39)* основывается также на том, что в случае нарушения условий отхода волны от поверхности корпуса, должен

изменяться знак в базовом дифференциальном уравнении, которое описывает волновые движения жидкости. В нашем случае можно воспользоваться другим частным решением для плоской волны [Войткунский Я.И., 1982]. Функция для потенциала G^{**} примет вид:

$$G' = \frac{i}{\lambda} e^{ikz - k\omega}. \qquad (40)$$

Переход к формуле (39) осуществляется только при следующих допущениях:

1. частота формы волны k не меняет величины в оконечностях корпуса, где нарушены условия отхода фазовой волны от корпуса;
2. потенциал G’ применим только на свободной поверхности, где $z=0$;
3. амплитуда рассчитывается по старым формулам, независимо от условий *(35)*:

$$A(\vartheta, x_0, y_0, z_0) = \frac{q(x_0, z_0)}{\lambda \cos\vartheta} e^{-kz_0} \approx \frac{q(x_0, z_0)}{\lambda \cos\vartheta} \cdot \mathrm{Re}\left(ie^{ikz_0}\right) \qquad (41)$$

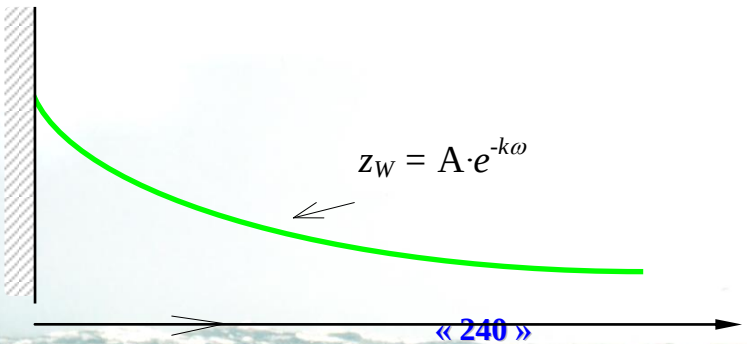
Группировка волн в разрушающиеся гребни

Мгновенная амплитуда в точке вершины волны не может превышать величины A<1.134/k, а высота волны должна удовлетворять ограничению:

$$h \le 0.75/k \quad \text{или} \quad h \le \lambda/8.38 \le 1. \qquad (42)$$

Если же крутизна волны превышает эти ограничения, то происходит интенсивное разрушение гребня волны с образованием буруна на ее вершине [Павленко, 1953], что качественно изменяет расчетную модель волнообразования.

При численном построении картины волнообразования и выполнении расчетов волнового сопротивления возможно использование двух способов ограничения роста амплитуды, в зависимости от выполнения условия *(35)*: $V \cdot \cos\vartheta \le V_0 q$.



(14)

$V_0 \cos \vartheta$

$\vec{\omega}$

Рис. 15. Формирование волнового гребня в районе форштевня.

1. Если условие *(35)* выполнено и расчеты ведутся по формуле *(38)*, то необходимо искусственно ограничивать амплитуду волнообразования:

$$A(\vartheta,x) = \int A(\vartheta,x,z)\cdot e^{-kz}\, dz, \qquad (43)$$

каким-то из искусственных способов добиваясь, чтобы амплитуда была не выше чем: $A(\vartheta,x) \le 1/k$. Таким образом, из расчетов будет исключаться энергия разрушающихся гребней, которая в случае безусловного использования линейной теории волн может необоснованно накапливаться. При построении картины волнообразования такие эффекты проявляются большими амплитудами волн и их завышенной крутизной.

2. Если же условие *(35)* не выполнено, то это означает, что волна не может оторваться от корпуса. Здесь можно применить метод накопления объема жидкости в зоне образования гребня, когда в соответствии с ростом амплитуды волны будет изменяться частота формы волны k. При этом должна поддерживаться постоянной площадь сечения под линией, задающей подъем свободной поверхности перед корпусом в направлении вектора $\bar{\omega}(\vartheta)$.

Площадь под кривой $Z_W = A\cdot e^{-k\omega}$ определяется интенсивностью волнообразующих источников $q(x_0, y_0, z_0)$, которые распределены по поверхности корпуса. Допустим, что A_o получается в результате расчетов амплитуды по формуле *(9)*; k_o - используемая в расчете частота формы излучаемой волны должна удовлетворять следующему условию: $S = \int_0^\infty A\, e^{-kl}\, dl = \frac{A_0}{k} = \frac{A_1}{k_1} = const$. Новая амплитуда волнового гребня и связанная с ним частота формы волны могут быть согласованы с условием отсутствия обрушения гребня стоячей волны:

$$A' = \frac{1}{k'} \; ; \quad k' \geq V_0^{\,2} \frac{q}{g}. \qquad (45)$$

В результате: $k' = \max\left(V_0^2 \frac{q}{g}, \sqrt{\frac{1}{S_0}} \right)$, или: $k' = \max\left(V_0^2 \frac{q}{g}, \sqrt{\frac{k_0}{A_0}} \right)$, *(46)*

В формуле (*46*) учтено, что если при уменьшении k перестанет выполняться условие отхода волны от корпуса *(35)* $\cos^2 \vartheta < |q|$, то амплитуда волны должна быть ограничена максимумом для стоячих трохоидальных волн. По-видимому, превышение амплитуды должно быть исключено из расчетов, так чрезмерное заострение гребня обычно сопровождается его разрушением, которое пока будем исключать из общей картины волнообразования.



Рис. 16. Вблизи корпуса корабля *происходит сложение и усреднение энергии всех высокочастотных проявлений корабельного волнообразования, с последующим излучением только некомпенсированной волновой энергии*

Формула *(46)* моделирует процесс стекания жидкости с гребня присоединенной к корпусу волны, такое стекание обычно наблюдается в эксперименте. В результате происходит уменьшение частоты формы волны, что проявляется как увеличение длины волны в точке ее отрыва от поверхности корпуса.

Для корпуса с полными обводами нарушение условия *(45)*: $k' \geq V_0^{\,2} \frac{q}{g}$ может привести к нарушению стационарности картины волнообразования, что обычно наблюдается в опытовых экспериментах и объясняется свойствами потенциала *(40)* $G' = \frac{i}{\lambda} e^{ikz - k\omega}$, допускающего осцилляционные решения в направлении аппликаты z.

В заключение необходимо отметить, что приведенные выше рассуждения и математические выкладки сделаны не только для обоснования расчетов волнового сопротивления. Это не имело бы особого значения в работе, посвященной проектированию мореходной формы корпуса корабля. Полученные уравнения и выводы могут быть использованы с целью восстановления поля корабельного волнообразования за движущимся кораблем, в котором каждый волновой гребень будет зависеть от формы конкретных участков поверхности корпуса. Возможность построения таких волновых полей необходима в качестве инструмента при проектировании формы корпуса корабля, приспособленного к плаванию как на спокойной воде, так и в условиях штормового волнения.

Математическая оптимизация подводных обводов и надводной формы корпуса корабля, по сути, является поиском технических решений, обеспечивающих прохождение штормовой волны через корпус с минимальными искажениями. Однако аналогичные математические модели описывают отражательные свойства формы корпуса под воздействием гидроакустических или радиолокационных волн, откуда следует дополнительное предположение, что оптимизация штормовой мореходности способствует скрытности корабля в море, а исторические корабли начала XX века удовлетворяли требованиям современных стеллс-технологий.

Численная реализация расчетов волнового сопротивления

Для более ясного понимания вычислительных алгоритмов и применения эмпирических зависимостей при невозможности прямого численного решения интеграла Мичелла (*25',33*) имеет смысл заменить аргумент в виде фазового угла Кельвина ϑ на длину излучаемой корпусом корабельной волны λ:

$$d\vartheta = \frac{d\lambda}{2\lambda \cdot \sqrt{\Lambda - \lambda}}$$ – выражение для дифференциала;

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = 2\pi \frac{V_0^2 \cos^2 \vartheta}{g}$$ – фазовая длина волны;

$\Lambda=2\pi V_0^2/g$ – критическая/максимальная длина поперечной волны;

$M=\dfrac{V_0}{C}=\sqrt{\dfrac{\Lambda}{\lambda}}=\dfrac{1}{\cos\vartheta}$ – аналог волнового число Маха;

$C=V_0/M$ – фазовая скорость волны;

$H=A\cdot\lambda\cdot M/4$ – функция Кочина.

Тогда основные расчетные формулы примут вид:

$$\omega_0=\frac{x_0}{M}+\frac{y_0\sqrt{M^2-1}}{M};\ \mathrm{A}(\lambda)=\frac{M}{\lambda}\cdot\left|\int_\Omega \mathrm{q}\cdot \mathrm{e}^{k\cdot(-z_0+i\omega_0)}\,d\Omega_0\right|;$$

$$R_X=\frac{\rho\cdot g}{4}\int_0^L \mathrm{A}^2(\lambda)\frac{d\lambda}{\lambda\cdot M\sqrt{M^2-1}}.$$

В общем случае функция $A(\lambda)$ сильно осциллирует и имеет особенность порядка $\lambda^{-3/2}$ при $\lambda\to 0$. Интеграл *(14)* для вычисления волнового сопротивления имеет особенности на границах порядка $\lambda^{-1/2}$ при $\lambda\to 0$ и $\lambda\to\Lambda$.

Указанные особенности могут быть ослаблены при использовании условий, учитывающих особенности волнообразования вблизи поверхности корпуса. Эти особенности обсуждались в предыдущей главе (формулы *35*, *38*, *39*, *42* и *46*).

Интеграл по ватерлиниям

$$A(\lambda,z)=\int_{-L/2}^{L/2} q(x,z)\cdot\exp\left(\frac{i\cdot k}{M}\left(x+y\sqrt{M2-1}\right)\right)dx. \qquad (47)$$

При малых значениях λ интеграл сильно осциллирует, в то же время при λ, имеющей порядок длины корпуса, этот интеграл не представляет никаких особенностей и может быть вычислен по методу Симпсона (“трапеций”). Для оценки степени осцилляции вводится параметр Np, задающий минимальное количество расчетных точек на одну длину волны λ. Критерием допустимости прямого интегрирования может быть поставлено следующее условие:

$$\frac{L}{Ni-1}\cdot Np\ge\frac{2\pi\quad M}{k}=\sqrt{\Lambda\cdot\lambda},$$

где L - длина между перпендикулярами; Ni - количество шпангоутов; Np - допустимое количество точек аппроксимации, приходящихся на один период рассчитываемой корабельной волны.

В случае если условие *(17)* не выполняется, то можно воспользоваться линейными аппроксимациями подынтегральных функций и аналитическим интегрированием каждой шпации в отдельности.

$$A(\lambda, z, \Delta x) = \int_{x_i}^{x_{i+1}} (a + bx)\exp(i(\alpha + \beta \quad x))dx,$$

$$a = \frac{q(x_i) + q(x_{i+1})}{2},\ b = \frac{q(x_{i+1}) - q(x_i)}{\Delta x},$$

$$\alpha = \left(\frac{x_i + x_{i+1}}{2} + \frac{y_i + y_{i+1}}{2} \cdot \sqrt{M^2 - 1}\right)\frac{k}{M},$$

$$\beta = \left(1 + \frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta x} \cdot \sqrt{M^2 - 1}\right) \cdot \frac{k}{M}.$$

$$A(\lambda, z, \Delta x) = \frac{\exp(i(\alpha + \beta \quad x))}{\beta}\left(ia - ibx + \frac{b}{\beta}\right)\Bigg|_{x_i}^{x_{i+1}} = \Phi(x_{i+1}) - \Phi(x_i)$$

Абсолютное значение интеграла A(λ,z) всегда меньше, чем максимальное значение по абсолютной величине от подынтегральной функции, равное максимуму от $q(x, z)\sqrt{\quad 1 + y_x'^2 + y_z'^2}$, достигаемому вблизи штевней. Если заранее рассчитать такие максимумы, то критерием достижения заданной точности при вычислении интеграла по ватерлиниям явится выражение $e^{-kz} \cdot |max(q \cdot \Omega)| > eps$.

где *eps* - принятая в расчетах абсолютная точность.

Иначе A(λ,z) = 0, если $e^{-kz} \cdot |\max(q \cdot \Omega)| > eps$.

Интегрирование результатов расчета по ватерлиниям

$$A(\lambda) = \int_0^T A(\lambda, z) \cdot e^{-kz}\, dz \qquad (48)$$

имеет экспоненциальную особенность при z$\rightarrow$*0*, которая определяет его величину при больших значениях *k* (то есть малых λ). Так как подынтегральная функция e^{-kz} всегда положительна, то знак абсолютной величины в формуле *(13')* может быть перенесен на A(λ,z). Знак

абсолютной величины ослабит, но не исключит возможность осцилляции функции A(λ,z), поэтому выбран метод вычислений, суть которого можно определить как двойную аналитическую аппроксимацию A(λ,z) в точках вблизи действующей ватерлинии (*где:* $z \to 0$).

Аппроксимируя |A(λ,z)| = f (z) с помощью параболы:

$$\int_0^Z f(z)\mathrm{e}^{-kz}\,dz = \int_0^Z \left(a + bx + cx^2\right)\cdot \mathrm{e}^{\beta z}\,dz = I(z),$$

$$\beta = -k;\ \ a = f(0);\ \ b = \frac{-3f(0) + 4f'(z_1) - f''(z_2)}{2\cdot\delta z};$$

$$c = \frac{f(0) - 2f'(z_1) + f''(z_2)}{2\cdot\delta\ \ z^2},\ \text{где: } f' = f\,\mathrm{e}^{-bx};\ f'' = f\,e^{-bx^2}.$$

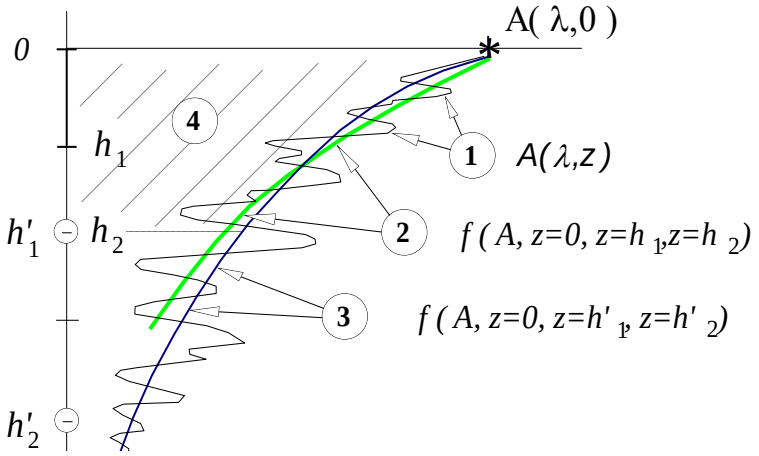


Рис. 17. Геометрическое представление *функции A(λ,z) и ее аналитических аппроксимаций.*

Ось Z полагается разбитой на равные интервалы: Δz – расстояние между ватерлиниями; $Z_1 = \Delta z$; . $Z_2 = 2\Delta z$, то:

$$\mathrm{I}(z_2) = \mathrm{I}(z_1, z_2) = \mathrm{e}^{\beta\ \ x}\cdot\left(\frac{a + bx + cx^2}{\beta} - \frac{b + 2x}{\beta^2} + 2\frac{c}{\beta^3}\right)\Bigg|_0^{Z_2};$$

$$\mathrm{I}(z_1') = \mathrm{I}(z_1', z_2') = \mathrm{I}(2\cdot z_1, 2\cdot z_2); \qquad \mathrm{I}(2\Delta z) = \frac{\mathrm{I}(z_2) + \mathrm{I}(z_1')}{2}$$

Показанная аналитическая аппроксимация применяется только в том случае, если значения функции |A(λ,z)| в точках z=0 и z=δz отличаются на порядок. Иначе ведется интегрирование по методу Симпсона.

Если же A(λ,0)/A(λ_1,z_1) >12, то используется расчет поправки вида: δA(λ,z) = I(2δz) - |A(λ,2δz)|δz /2

После этого последние две точки в массиве A(λ, z_i) обнуляются, и дальнейшее интегрирование ведется по методу трапеций.

Интеграл по волновому спектру, расчет сопротивления

$$R_X = \frac{\rho \quad g}{4}\int_0^{\Lambda}\frac{A^2(\lambda)\cdot M}{\lambda^2\sqrt{M^2-1}}d\lambda = \frac{\rho \quad V_0}{4}\sqrt{2\pi \quad g}\int_0^{\Lambda}\frac{A^2(\lambda)}{\lambda^2\sqrt{\Lambda-\lambda}}d\lambda \qquad (49)$$

Здесь A имеет размерность [м^2] и обладает экспоненциальным стремлением к нулю при $\lambda \to 0$. Сам же интеграл имеет особенности в точках $\lambda \to \Lambda$ типа $\lambda^{-1/2}$; $\lambda \to 0$ типа λ^{-2}, которая гасится экспонентой в выражении $\frac{A^2(\lambda)}{\lambda^2\sqrt{\Lambda-\lambda}} = f(\lambda)$.

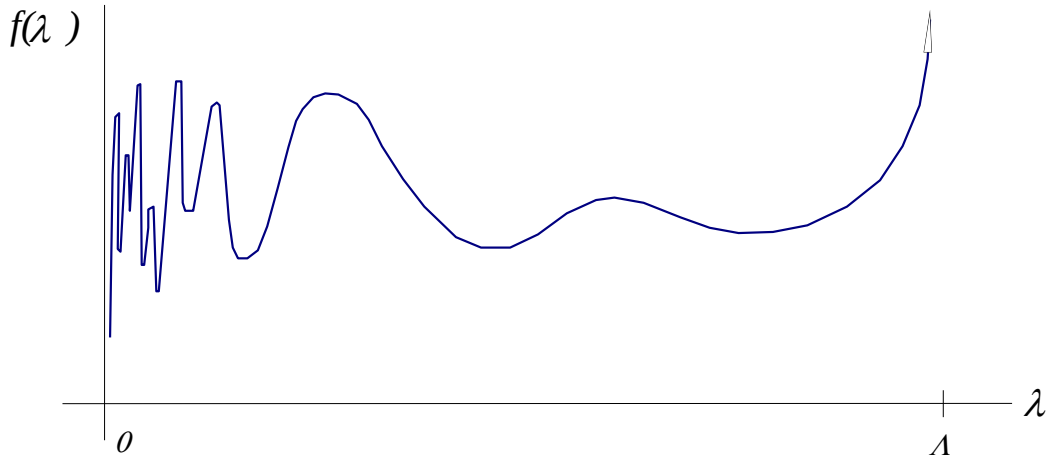


Рис. 18. Характер поведения подынтегральной функции:

При вычислении интеграла по волновому спектру необходимо постоянно оценивать степень осцилляции функции *f(λ)*. Разбивая этот интеграл на две части:

1) [λ_i : Λ] - слабо осциллирующую,

но обладающую особенностью типа $\lambda^{-1/2}$ при $\lambda \to \Lambda$;

2) [0 : λ_i] - сильно осциллирующая часть интеграла, включающую очень короткие корабельные волны, которые принципиально не могут оторваться от корпуса корабля.

Для поиска критического значения λ_i можно воспользоваться следующей оценкой подынтегральной функции в выражении для интеграла по ватерлиниям:

$$\exp\left(\frac{i\ \ k}{M}L\right) = f(\lambda) = \exp\left(\frac{i\cdot 2\pi\cdot L}{\sqrt{\lambda\Lambda}}\right),$$

где: L - длина судна. Если допустить “проход” трех периодов волн в полученной зависимости от аргумента λ, тогда:

$$\lambda_i = \frac{(L/\Lambda)^2}{(L/\Lambda+3)^2}\cdot\Lambda,$$ а отношение $\Lambda/L = 2\pi\cdot F_N^2$.

Для вычисления интеграла $\int_{\lambda_i}^{\Lambda} f(\lambda)d\lambda$ был использован рекурсивный алгоритм, основанный на использовании полиномов Гаусса 4-й степени, которые удовлетворительно аппроксимируют функции с особенностями на границах интервала интегрирования. При вычислении интеграла $\int_0^{\lambda_i} f(\lambda)d\lambda$ использовался традиционный «метод трапеций», так как его аппроксимации не приводят к разрывам решений с осциллирующими функциями.

Математические модели формы корпуса и оценочные расчеты волнового сопротивления

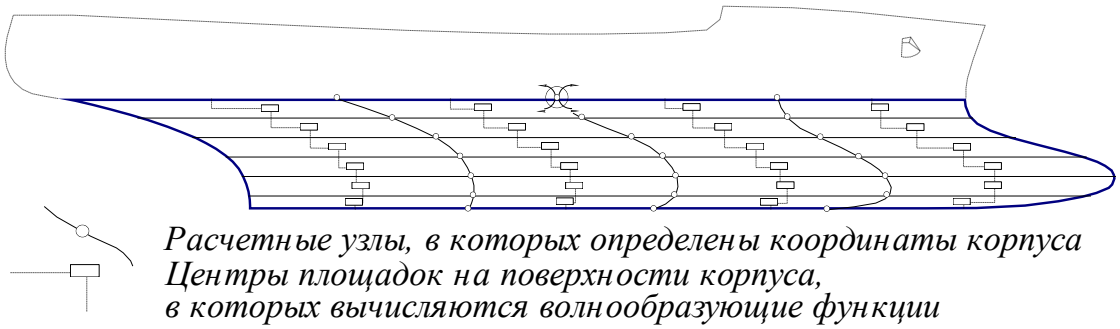
Проведение вычислительного анализа формы корпуса предваряло подготовку к испытаниям модели в опытовом бассейне. С этой целью использовалась математическая модель корпуса, позволяющая варьировать полноту мидель-шпангоута, продольную асимметрию полноты корпуса и размеры носового бульба. Такая модель была создана в 1976 году на борту РТМС "Багратионовск" в Южной Атлантике, чему способствовало наблюдение за штормованием судов океанского рыбопромыслового флота, за необычными мореходными качествами маломерных судов африканских стран, а также, что не менее важно, знакомство с особенностями свободного плавания и активного движения вблизи взволнованной поверхности моря различных животных (рыб, акул, дельфинов и водоплавающих птиц). Эта модель позволила изучить влияние носового бульба, а также получить качественную оценку более сложных элементов несимметричных относительно мидель-шпангоута обводов корпуса.

Для сравнительного анализа волнового сопротивления использовались также традиционные аналитические описания формы корпуса корабля, основанные на применении параболических (степенных) функций, которые при гладком вписывании в контуры штевней в равной мере позволяют оценить главные параметры простейших форм корпуса. Параболическая форма корпуса наиболее ярко отражает особенности корабельного волнообразования, так как при обтекании этих упрощенных корпусов не образуется сложных трехмерных потоков и соответственно не происходит «нелинейной» минимизации волнообразования, что на графиках волнового сопротивления проявляется хорошо выраженными экстремумами на малых скоростях.

Для проведения оценочных расчетов в программное обеспечение были включены две аналитические модели, в которых реализованы возможности задания коэффициентов полноты корпуса и действующей ватерлинии, а также предусмотрено перераспределение подводных объемов вдоль продольной и вертикальной осей. Аналитические модели учитывают изменение главных элементов формы корпуса, которые затем оптимизировались с целью отработки оптимального теоретического чертежа гипотетической модели для экспериментальных исследований мореходности в опытовом бассейне.

Представление формы корпуса для расчетов на ЭВМ

При аналитическом описании формы корпуса возможно получение ординат $y(x,z)$, их производных y'_x и y'_z, тем не менее, использование этих выражений при выполнении вычислительных экспериментов не всегда удобно. Обычно возникают проблемы, связанные с длительностью вычисления элементарных функций или из-за необходимости унификации описания реальных и модельных корпусов судов.



Расчетные узлы, в которых определены координаты корпуса
Центры площадок на поверхности корпуса,
в которых вычисляются волнообразующие функции

Рис. 19. Дискретное разбиение подводной части судовой обшивки для построения численной модели формы корпуса.

При проведении численного моделирования волнового сопротивления данные о форме корпуса хранятся в прямоугольных массивах, с помощью которых производится интерполяционное описание отдельных ватерлиний.

Для решения уравнений Мичелла, в которых интегрирование по поверхности корпуса ведется обычно вдоль ватерлиний, каждая ватерлиния может быть разбита на произвольное количество участков (N) в интервале между точками пересечения штевней. При этом расстояние между ватерлиниями может быть произвольным.

Структура основных расчетных массивов в памяти ЭВМ:

FI [0:N, 0:K] – таблица ординат;

YX [0:N, 0:K] – таблица производных f'_x;

X [0:N, 0:K] – таблица абсцисс для точек **FI**;

Z [0:K] – вектор аппликат ватерлиний;

N – количество интервалов (*шпаций*) по *x* (*длине корпуса*);

K – количество интервалов по *z* (*слои между ватерлиниями*).

На практике расчеты с использованием сеточного определения формы корпуса выполняются быстрее как при вычислении ординат, так и их производных. Для описания же реального корпуса с целью проведения серии сложных вычислительных экспериментов этот метод является единственным.

“Параболические” (степенные) обводы

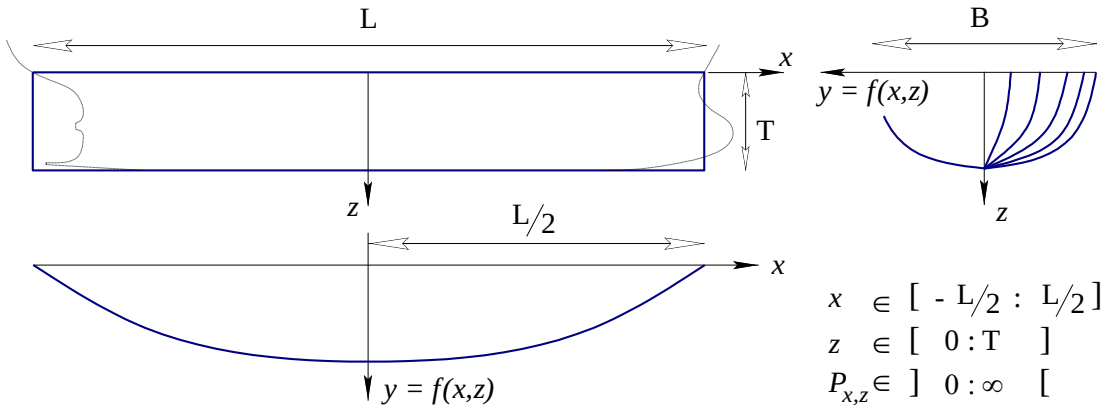


Рис. 20. Область определения функций для моделирования параболических обводов формы корпуса.

При оценке влияния полноты обводов корпуса использовано описание формы корпуса с помощью степенных функций, задающих ватерлинии симметричными относительно мидель-шпангоута. Построение аналитических обводов корпуса выполняется непосредственно в программе расчета волнового сопротивления по формуле:

$$f(x,z) = \frac{B}{2}\cdot\left(1-\left(\frac{2\cdot x}{L}\right)^{N}\right)\cdot\left(1-\left(\frac{z}{T}\right)^{M}\right),$$

для которой коэффициент полноты площади ватерлинии: $\alpha = N/(1-N)$;

- коэффициент полноты мидель-шпангоута: $\beta = M/(1-M)$

- и коэффициент общей полноты подводной части корпуса: $\delta = \alpha/\beta$.

Целью систематических расчетов волнового сопротивления ставится задача выбора оптимальной формы корпуса для движения на любой скорости хода. В частности на скоростях, соответствующих максимальному волновому сопротивлению при числах Фруда: $Fn = 0{,}3$ и $Fn = 0{,}5$, а также в области интенсивного излучения расходящихся корабельных волн при минимуме сопротивления на скорости хода: $Fn = 0{,}4$

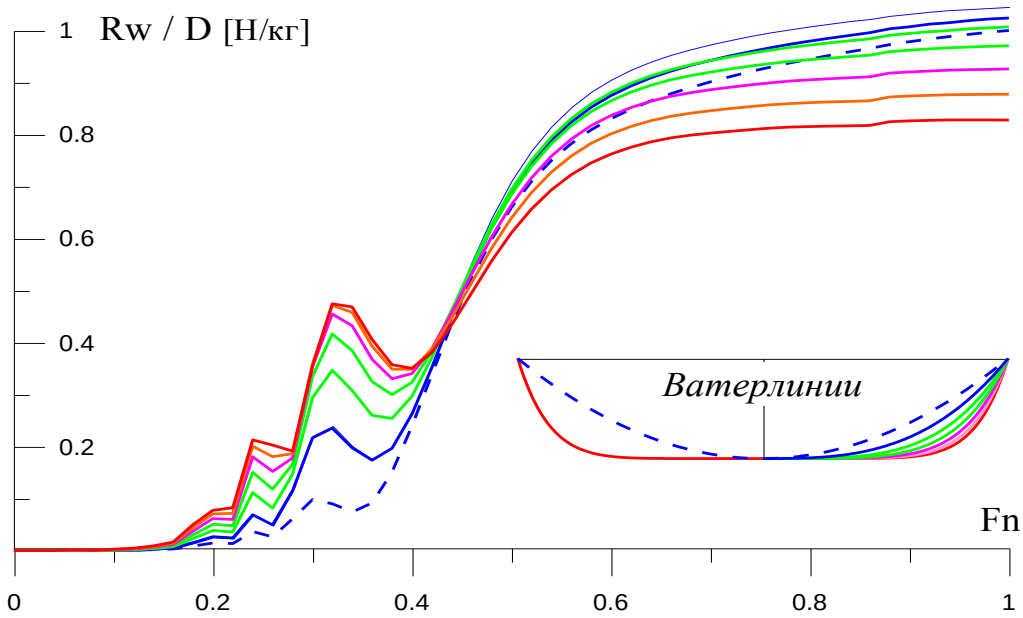


Рис. 21. Расчетные кривые удельного волнового сопротивления, отнесенного к водоизмещению, для симметричного относительно мидельшпангоута параболического корпуса

В таких оценочных расчетах волнового сопротивления приняты следующие размерения корпуса: длина – L=90; ширина – B=16; осадка – T=8.

Характеристики моделей корпуса с параболическими обводами (КПО)

N	M	α	δ	S [м^2]	D[м^3]
2	**2**	0.67	0.44	2702	5120
3	**3**	0.75	0.56	2940	6480
3	**4**	0.75	0.6	2971	6912
4	**4**	0.8	0.67	3090	7373

N	M	α	δ	S [м^2]	D[м^3]
5	**5**	0.83	0.69	3190	8000
6	**6**	0.85	0.73	3257	8464
7	**7**	0.88	0.77	3302	8820
8	**9**	0.89	0.79	3333	9102

Из анализа графиков удельного волнового сопротивления следуе:

1. Увеличение полноты ватерлинии существенно сказывается на удельном сопротивлении при скоростях хода Fn = 0.4 и менее;
2. Полнота ватерлиний и шпангоутов мало влияет на величину удельного сопротивления при Fn ≥ 0.5, однако при существенном увеличении полноты корпуса удельное сопротивление уменьшается;

3. Увеличение полноты мидель-шпангоута приводит к уменьшению удельного сопротивления при скорости Fn = 0.5 и практически не влияет на сопротивление при Fn = 0.3;
4. Довольно слабо заметно смещение экстремумов волнового сопротивления вправо, что говорит о том, что волнообразующая длина для обводов корпуса, образованных степенными функциями слабо зависит как от полноты ватерлиний, так и от общей полноты корпуса.

Асимметричный относительно мидель-шпангоута корпус

Построение корпуса основано на произведении косинусоиды с обратной степенной функцией, которые сопрягаются вблизи оконечностей корпуса, где обе функции или их производные терпят разрывы.

$$f_1(x) = \frac{1}{2}\left(1+\cos \pi x\right),$$

$$f_2(x) = \frac{P}{P+2}\left(\left(P\cdot\left(1-x\right)\right)^{-z-1} + \left(P\cdot\left(1+x\right)\right)^{z-1} + 1\right)$$

Произведение f_1 x f_2 образуют семейство кривых, которые в зависимости от параметра P образуют следующие формы ватерлиний:

1. Косинусоиды $P \geq 10$;
2. Бульбовые формы ватерлиний $1 \leq P \leq 5$;
3. Форма капли $P \approx 1$;
4. Форма крыла ската $P \leq 0.5$.

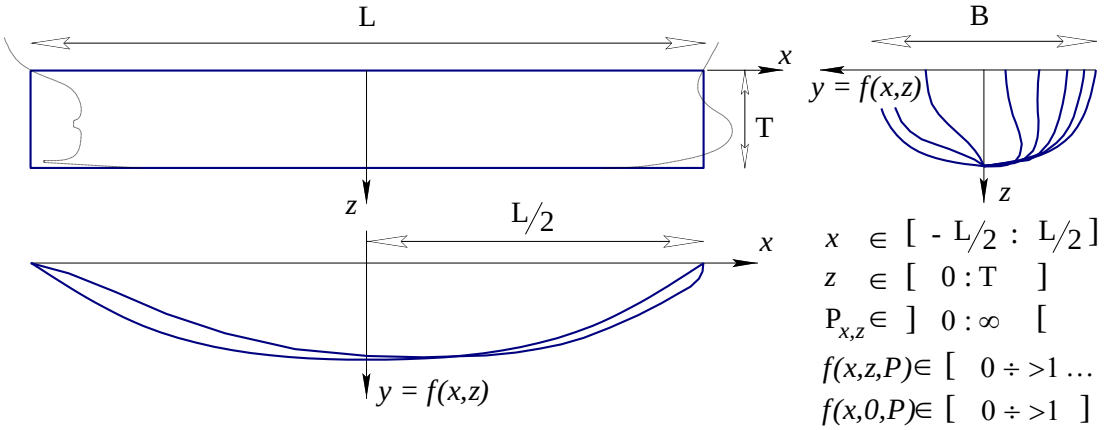


Рис. 22. Система координат и линии чертежа асимметричного корпуса

Из анализа поведения функции $f_1 \cdot f_2$ вблизи оконечностей сделано заключение, что аргумент z для реального корпуса должен лежать в

пределах $z \in [0 \div 0.5]$, но принятый в расчетах интервал $z \in [0 \div 1]$ позволяет более контрастно представить особенности формы аналитического корпуса.

Для контура мидель-шпангоута введена степенная гипербола:

$$B(z) = (1-z)\frac{2(P+2)}{P} = (1-z)^{\left(2+\frac{4}{P}\right)},$$

которая обеспечивает сохранение формы подводного крыла при малых P и уменьшает полноту мидель-шпангоута до сравнимого с параболой при увеличении параметра P.

Область определения:

Можно определить параметры полноты раздельно для кормовой и носовой частей корпуса Pa и Ps:

$$f(x,z) = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{Pa}+\frac{1}{Ps}+1\right)^{-1} \cdot (1-z)^{\left(2+\frac{8}{Pa+Ps}\right)} \times$$
$$\times (1+\cos \pi x)\left((Ps(1-x))^{-z-1} + (Pa(1+x))^{z-1} + 1\right).$$

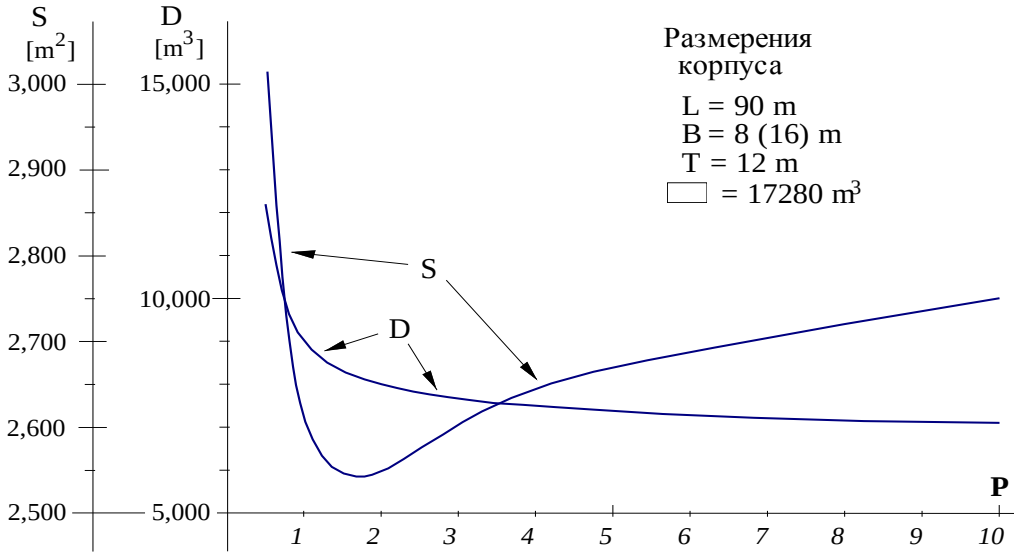


***Рис. 23. Кривые водоизмещения (D) и смоченной поверхности (S)** в зависимости от параметра P ассиметричной модели корпуса гипотетического судна. L - длина, B - ширина, T - осадка и □ - объем размерного параллелепипеда.*

При этом:

1. Увеличение P приводит к заострению ватерлиний в оконечностях и уменьшению размеров бульба, одновременно уменьшается ко-

эффициент общей полноты. При $P \to \infty$, корпус описывается косинусоидами по ватерлиниям и параболами по шпангоутам;

2. Уменьшение P приводит к появлению развитого бульба, увеличению глубины погружения и росту его ширины, что может превратить бульб в “крыло ската”. В кормовой части ватерлинии заостряются, превращая ахтерштевень в подобие “плавника”. Увеличивается также коэффициент общей полноты корпуса, еще быстрее растет смоченная поверхность;
3. Оптимальное соотношение между объемом корпуса и площадью смоченной поверхности при P ≅ 1.5 (*Ch(1.0)=1.54308*).

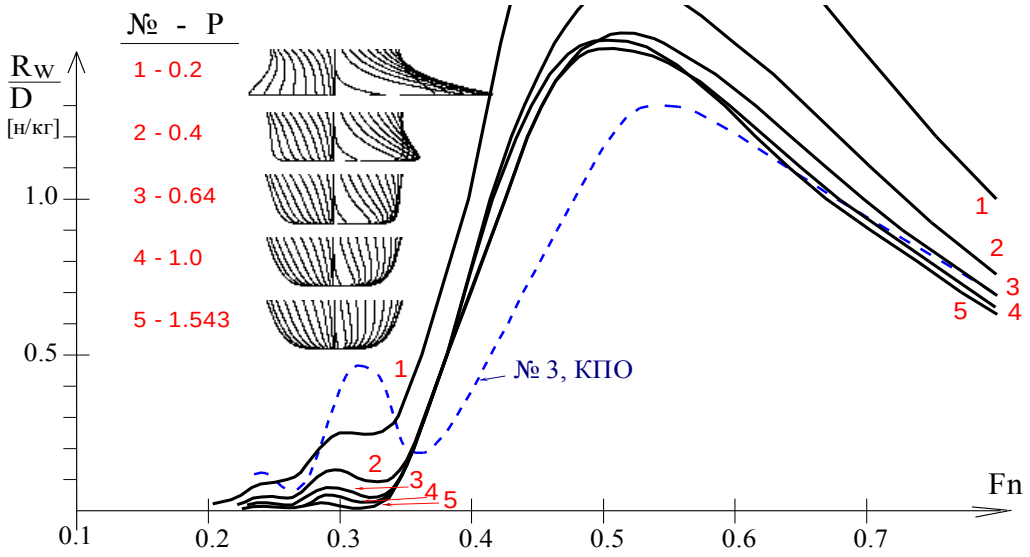


Рис. 24. Расчетные кривые удельного волнового сопротивления для несимметричного относительно мидель-шпангоута корпуса с экспоненциально-тригонометрическими обводами. *Синим пунктиром показан расчет для корпуса с параболическими обводами, отмеченной под № 3 в предыдущей серии расчетов.*

Из анализа графиков удельного волнового сопротивления (*отношения волнового сопротивления к водоизмещению, рис.24*) следуют выводы:

1. Применение носового бульба существенно снижает удельное волновое сопротивление на скорости хода, соответствующей минимуму на Fn = 0.3. При этом большая полнота действующей ватерлинии не приводит к значительному увеличению сопротивления, которое наблюдалось у корпусов с симметричными параболическими обводами;

2. Если параметр P ≥ 1.5, то сопротивление на скорости Fn = 0.3 становится исчезающе малым. При этом расчетные алгоритмы были нечувствительны к тому, где - в носу или в корме - находится бульб;
3. Если P < 1.5, то применение кормового бульба приводит к значительному росту удельного сопротивления на Fn = 0.3. Но при этом оно сравнимо с сопротивлением корпусов с параболическими обводами;
4. Корпус с экспоненциально тригонометрическими обводами (КЭТО) показал худшую ходкость на скорости, соответствующей Fn=0.5, по сравнению с корпусами симметричными относительно мидель-шпангоута (КПО);
5. Можно также отметить, что носовой бульб уменьшает относительную разность между экстремумом удельного сопротивления на Fn = 0.3 и минимумом сопротивления на Fn ≈ 0.35.

За оптимальный корпус можно принять обводы с параметром P = 1.0, так как при таком параметре обнаружен минимум удельного волнового сопротивления на скорости хода Fn=0.5. В этом случае в носовой части корпуса располагается развитый и заглубленный бульб.

Моделирование уменьшенной площади ватерлинии

Как уже показывалось в выводах из исторического анализа мореходных качеств, обусловленных формой корпуса судна, улучшение мореходности на волнении достигается за счет завала бортов в средней части корпуса на уровне действующей ватерлинии. Моделирование такого завала бортов и уменьшенной ширины ватерлинии выполнялось путем линейной деформации всего корпуса по закону:

$$f^{*}(x,z) = f(x,z)\cdot(1+z\cdot(1-k)),$$

где: $z = z/T$,[34] k - коэффициент сужения (деформации) ширины действующей ватерлинии. Если необходимо сохранить коэффициент об-

[34] Замечание: $z=z/_T$ - означает, что величина z нормирована до единицы.

щей полноты, то при использовании данной формулы необходимо проводить дополнительную корректировку общей ширины корпуса.

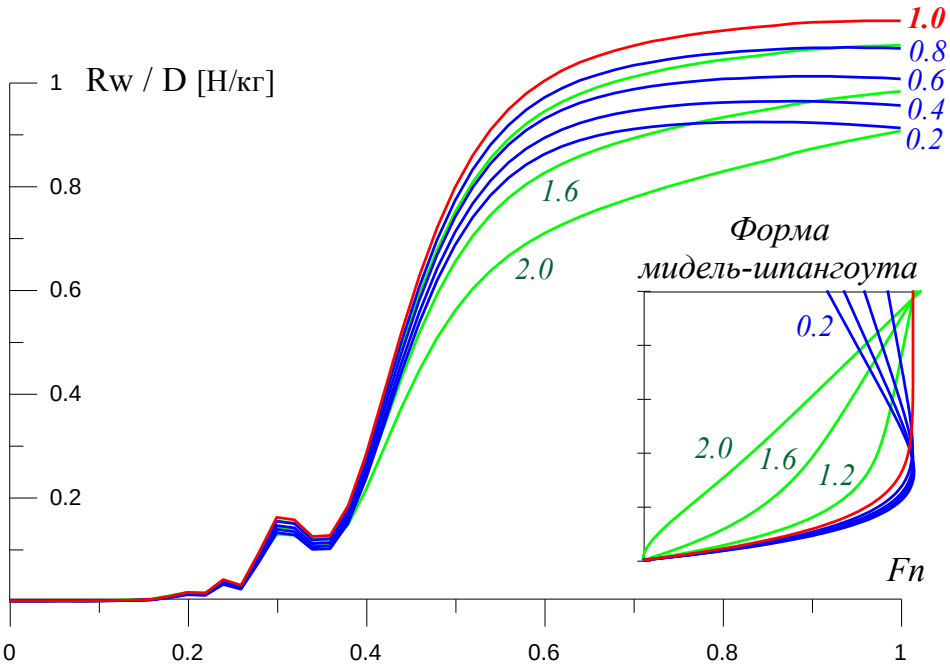


Рис. 25. Расчетные кривые удельного волнового сопротивления *при изменении наклона бортов на уровне действующей ватерлинии в средней части корпуса.*

Наклон борта в средней части корпуса (рис.25) слабо влияет на удельное сопротивление на малых и средних скоростях хода, до Fn≤0.4. Расчеты также показывают, что обводы с вертикальными бортами дают максимальное волновое сопротивление на больших скоростях при Fn>0.4, когда длина излучаемой корабельной волны становится больше длины корпуса корабля. Как завал, так и развал бортов приводит к уменьшению удельного волнового сопротивления на больших скоростях хода. Это означает, что испытания на спокойной воде в опытовом бассейне, которые редко проводятся на скоростях хода более чем Fn>0.5, могут показать улучшение ходовых качеств как для судна с завалом бортов, так и с его развалом. Реальные испытания штормовой мореходности корабля могут дать обоснованные проектные решения только при постановке соответствующих мореходных испытаний на волнении.

На рис. 25 показан расчет кривой волнового сопротивления для развала бортов с коэффициентом k=2.0, при котором мидель-шпангоут

становится почти треугольным. Несмотря на существенное уменьшение коэффициента общей полноты получившегося корпуса, все же удельное волновое сопротивление на высоких скоростях хода остается достаточно значительным, а это означает, что на такой корпус будут очень активно воздействовать штормовые волны большой длины.

Форштевень

Форма корпуса в носовой части корабля отвечает за весь комплекс его мореходных качеств. Если корабль не может обеспечить движения в штормовую погоду, то его нос должен быть полным, центр величины также должен быть смещен в нос, обеспечивая штормование в режиме гидродинамического флюгера.

Если же речь идет о ходовых качествах корабля, то необходимо помнить не только о минимизации сопротивления “формы” (*волнового сопротивления*), но и о снижении эффективности взаимодействия корпуса с внешним волнением, для которого требуется отработка обводов как в подводной, так и в надводной частях корпуса.

Это означает, что в носовой части обводов корпуса необходима отработка каждого элемента обшивки корпуса таким образом, чтобы были минимизированы все составляющие корабельного волнообразования, а также отработаны все участки обшивки в надводной части корпуса, которые, потенциально, могут воспринять на себя энергию внешних морских волн.

Форштевень описывается с помощью степенных функций, моделирующих заданное положение бульба по глубине (a) и определяющих величину выступа этого бульба вперед, от точки пересечения штевнем поверхности воды (l).

Область определения:

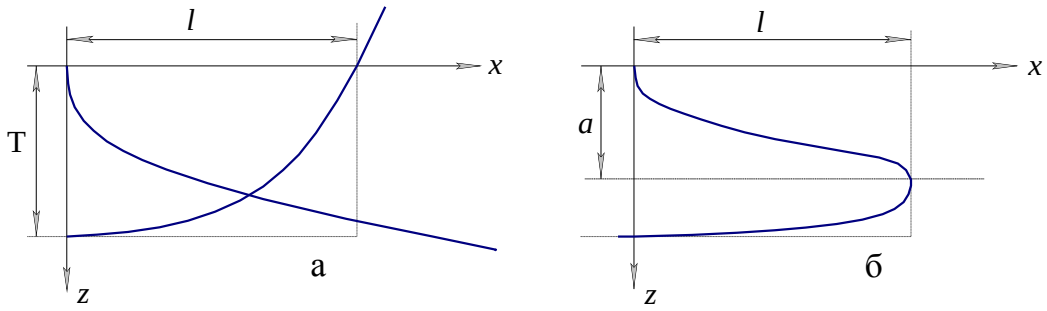


Рис. 26. *Функции, образующие форштевень (а), и их произведение (б).*

Форштевень образуется произведением двух функций:

$$x = \frac{L}{2} + L \cdot \left(\frac{z}{T}\right)^{m} \cdot \left(1 - \frac{z}{T}\right)^{\frac{1}{n}}; \qquad n = \frac{\ln(T-a) + \left(\frac{1}{a} - 1\right) \cdot \ln a}{\ln l}; \qquad m = \frac{T-a}{na}.$$

где: $l \in]\,0 \div 1\,[$ - относительная длина бульба;

$a \in]\,1/2 \div 1\,[$ - относительное погружение бульба.

Ахтерштевень

Задание формы ахтерштевня с помощью сектора эллиптического контура обеспечивает формирование традиционного кормового подзора как для параболической, так и для асимметричной модели корпуса. При этом совсем не обязательно, чтобы ахтерштевень имел именно эллиптическую форму, а связанное с эллиптическим преобразованием смещение ватерлиний определяет в первую очередь общий характер обводов корпуса в кормовой части.

Область определения:

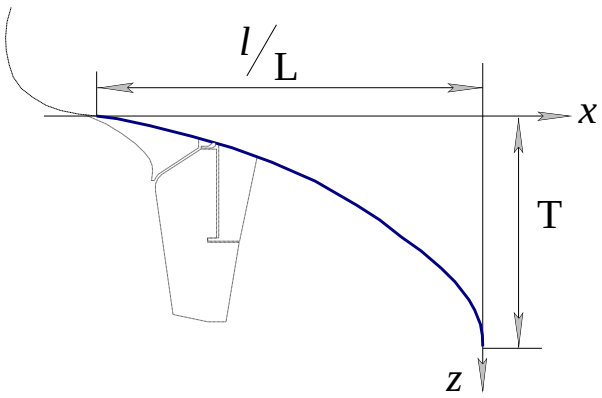


Рис. 27. Описание кормового подзора с помощью эллипса.

Ахтерштевень описывается эллипсом: $x = -\frac{L}{2} + L \cdot l \cdot \sqrt{1 - \left(1 - \frac{z}{T}\right)^2}$,

где: l – *относительная длина кормового подзора.*

Окончательный вид линии контура ахтерштевня и кормовые ветви ватерлиний должны согласовываться локально, при этом характер линий тока должен подстраиваться под особенности работы винторулевого комплекса и обеспечивать его безотрывное обтекание. Важным критерием при оформлении кормового подзора является ориентация на стабилизацию корпуса на ходу и обеспечение штормовой безопасности при плавании без хода (*когда мощности движителей не хватает для управления движением корабля*).

Примеры построения аналитических корпусов

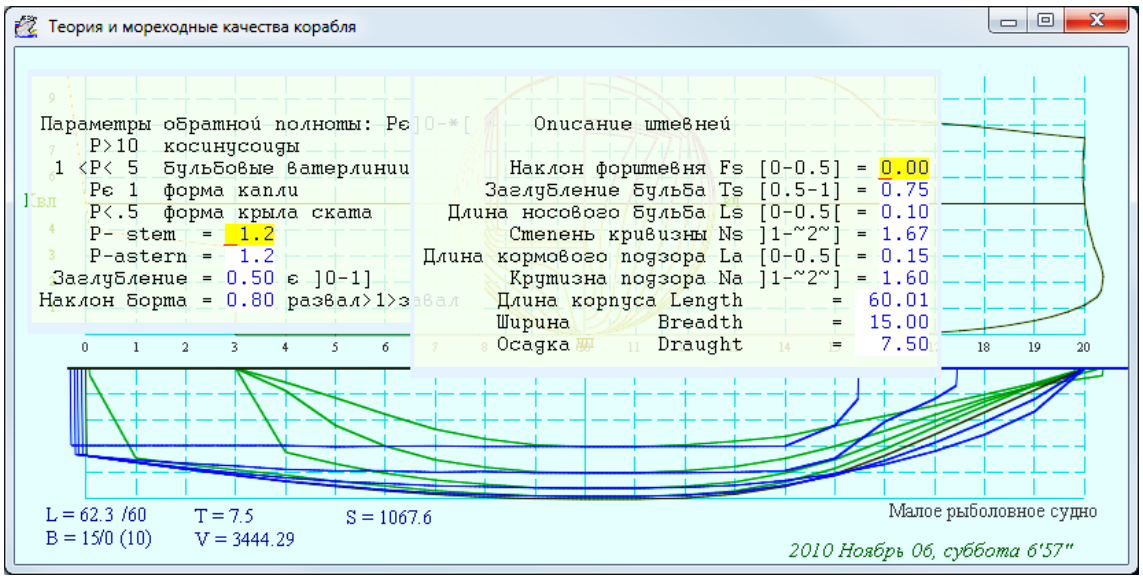


***Рис. 28. Программный комплекс Hull**, включающий работу с таблицами плазовых ординат и построение вышеописанных аналитических корпусов; расчеты остойчивости и гидростатических кривых; волнового сопротивления и интенсивности излучения корабельных волн вдоль корпуса. Зарегистрирован в Роспатенте:* Г/р № 2010615849, *опубликован на* www.ShipDesign.ru/SoftWare.

Теоретические чертежи, приведенные в данной главе, были получены для проведения оценочных вычислительных экспериментов с сериями различных судов, где аналитическое описание формы корпуса гарантировало плавное изменение заданных характеристик судовых

обводов. Иллюстрации сняты с растрового изображения на графическом терминале ЭВМ.

В качестве главных недостатков для “параболического” и “асимметричного” корпусов можно отметить упрощенное описание скуловых обводов, где с помощью специальных изгибов корпуса должно происходить гашение энергии расходящихся корабельных волн. Формально же, анализ расходящихся корабельных волн выходит за рамки теории «тонкого судна» Мичелла. Формирование этих волн является сугубо трехмерным процессом, связанным с вихреобразованием на поверхности тяжелой жидкости, где вихревые линии вытянуты вдоль корпуса (*правильное построение формы скуловых шпангоутов могло бы уменьшить волнообразование в точке минимума (Fn=0.4) на кривой остаточного сопротивления)*.

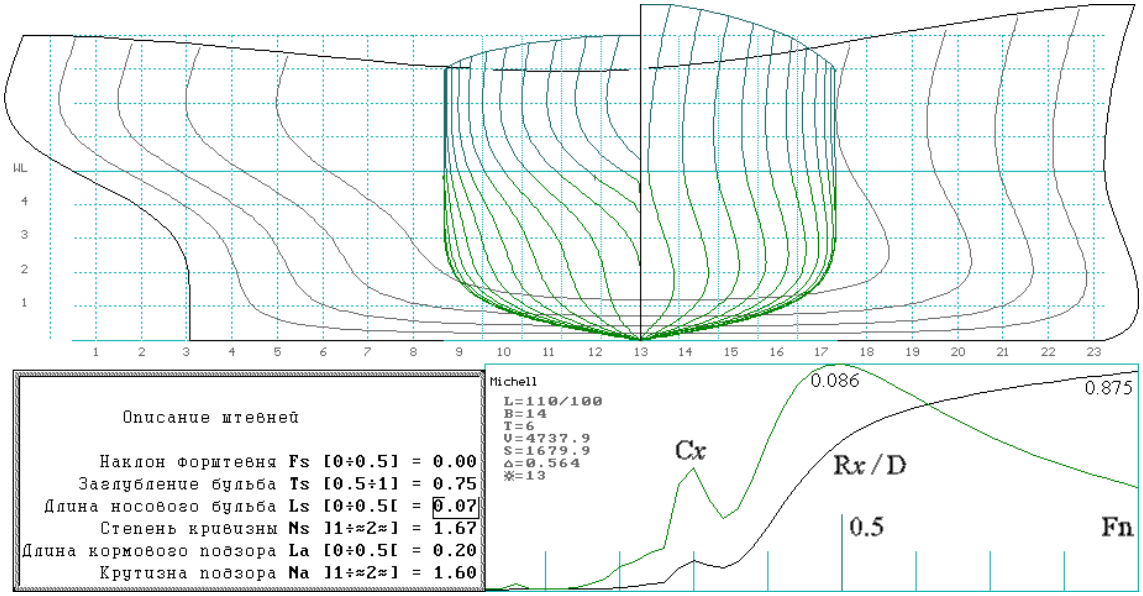


Рис. 29. Корпус, построенный из “параболических” функций. *В табличке приведены параметры, определяющие форму штевней. На графике справа приведены расчетные кривые коэффициента Cx и удельного Rx/D волновых сопротивлений. Слева внизу показаны: Ns - задает плавную стыковку бульбового профиля с основной линией; Na - определяет угол пересечения ахтерштевня с ватерлинией.*

В расчетах использована аналитическая модель корпуса судна, чито требовалось для сравнения результатов с сериями измерений волнового сопротивления в опытовом бассейне. Учитывая, что опытовая модель корабля имела несколько экстраординарные обводы, было

принято решение о совместных опытовых экспериментах со стандартными моделями судов, имеющими традиционные обводы.

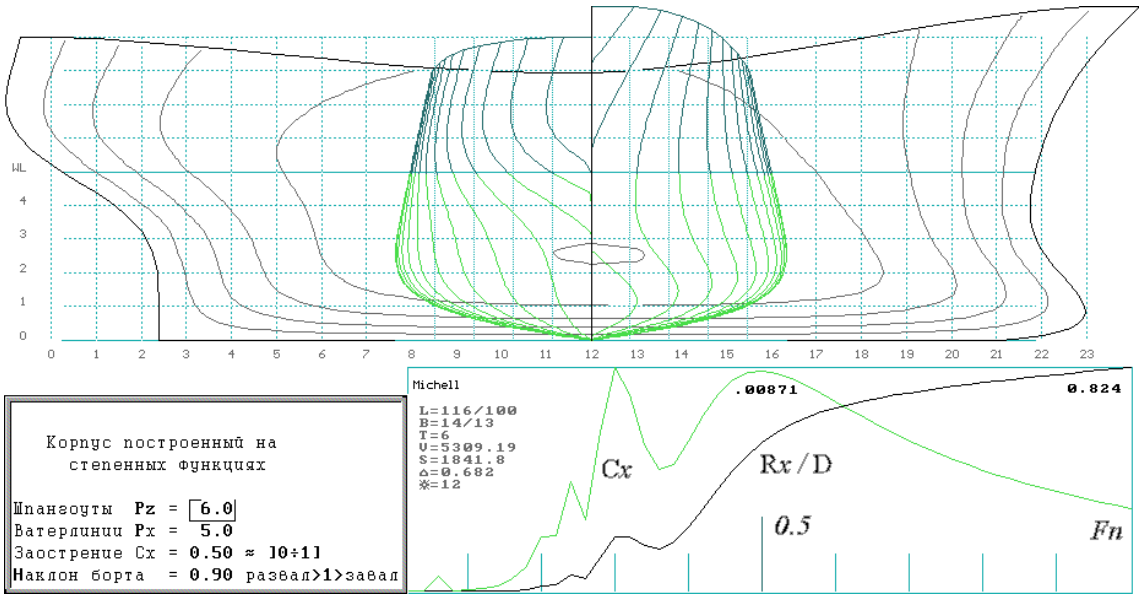


Рис. 30. Тот же корпус, но с увеличенной полнотой ватерлиний, наклонным форштевнем и завалом бортов. *Приведены расчетные кривые коэффициента и удельного волнового сопротивления. Увеличение полноты ватерлинии приводит к существенному увеличению волнового сопротивления на малых скоростях хода, с появлением пика на буксировочной кривой на Fn=0.3.*

Выбранная модель соответствует случаю усиления мореходных свойств, зависящих от формы корпуса, если в качестве цепочки для сравнения выбрать:

- - современный корабль, пассажирское или быстроходное транспортное судно;
- - корабль или судно постройки 1920 - 1950 годов;
- - корабль или судно, построенное в XIX веке или до 1905 года;
- - гипотетическое судно, выбранное для испытаний в опытовом бассейне в 1985 году.

Из анализа следующих рисунков можно понять трудности при оптимизации формы скуловых шпангоутов, так как при уменьшении волнового сопротивления за счет влияния бульба на (*Fn=0.3*) одновременно наблюдается рост сопротивления за счет сглаживания минимума на скорости, соответствующей (*Fn=0.4*).

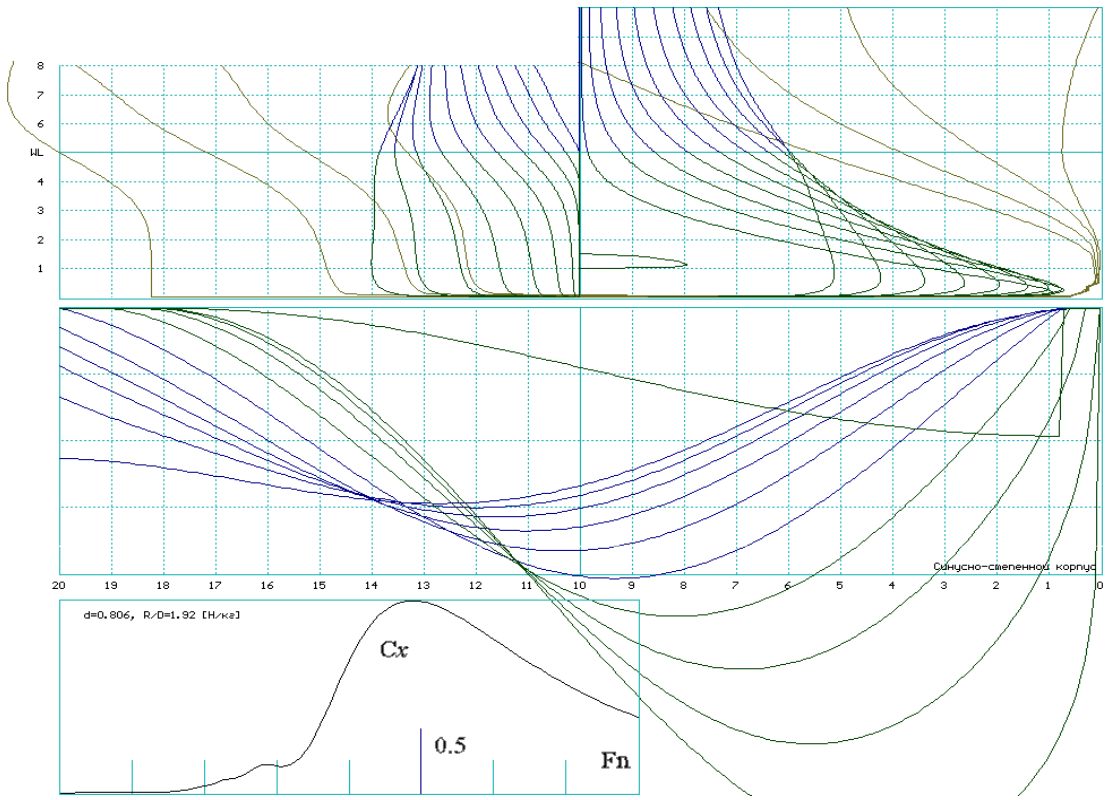


***Рис. 31. Крайняя форма аналитического представления бульбовых обводов**, когда бульб становится похожим на «крыло ската».*

Для решения задачи об оптимизации формы корпуса на этих промежуточных скоростях необходимо как уточнение расчетов по формулам Мичелла, путем полуэмпирического учета нелинейных эффектов волнообразования, так и дополнительный анализ волновой картины с целью ее физико-геометрической интерпретации и поиска решений по форме корпуса в районах скулы и кормовой раковины.

Главной целью настоящего исследования является поиск обобщенных методов снижения волнообразования и взаимодействия корпуса корабля со штормовым волнением. Вычислительные эксперименты поэтому ограничиваются минимизацией поперечной системы корабельных волн, образующихся на больших скоростях хода (*в том числе при* $Fn \geq 0.5$), и которые сопоставляются с силовым воздействием на корабль штормового волнения, когда свободные морские волны соизмеримы или более длинные, чем основные размерения корабельного корпуса. Это позволило несколько упростить вычислительные алгоритмы, использованные в расчетах данной главы (рис. 29-32),

справедливость которых обоснована только для скоростей хода более чем $Fn \geq 0{,}2$.

Основные выводы об использовании численных решений

Интегралу Мичелла уже более 100 лет [*Michell J.H.* 1898], и до настоящего времени он представляется необычайно сложной математической загадкой, неразрешимой в аналитических исследованиях его разрывных и сильно осциллирующих подынтегральных функций и столь же трудной в прикладной постановке численных задач о волновом сопротивлении и корабельном волнообразовании.

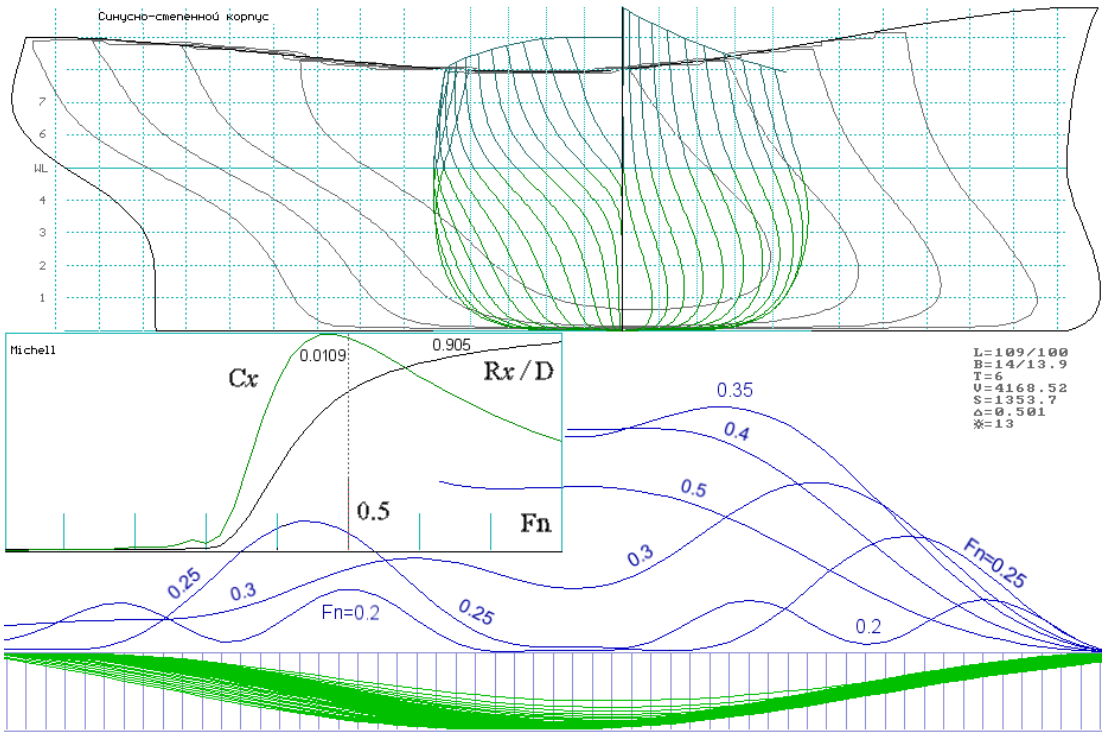


Рис. 32. Асимметричный относительно мидель-шпангоута корпус позволяет минимизировать волновое сопротивление на скоростях хода до чисел Фруда порядка Fn=0.3*, чему способствует смещенная в нос полнота подводной части корпуса. Аналогичный выигрыш на средних скоростях хода дают обводы корпуса в виде «двойного клина». При этом, несмотря на очень вогнутые и острые ватерлинии, удельное сопротивление на Fn=0.5 не уменьшилось, а также минимум на Fn=0.4. Синими линиями показано распределение интенсивности зарождающейся вдоль корпуса волновой энергии. Числа рядом с этими кривыми отмечают соответствующую скорость хода.*

Тем не менее, по серии приближенных вычислений можно сделать выводы, что при заострении ватерлиний снижается волновое сопротивление на скорости хода, соответствующей максимуму волнового сопротивления при Fn≈0,3, являющегося барьером ходкости для быстроходных транспортных судов. Подтверждается снижение экстремума на кривой волнового сопротивления на скорости порядка Fn≈0,2, достигаемое применением бульбовых обводов в оконечностях традиционным «закручиванием» скуловых обводов, а также – уменьшением относительной осадки корпуса. При плохом построении формы корпуса, расчеты по Мичеллу предсказывают потерю ходкости в экономичных режимах плавания, соответствующих минимумам волнового сопротивления на числах Фруда порядка Fn≈0,24 и Fn≈0,4.

Реальное поле корабельного волнообразования дает интегральное представление всего спектра излучаемых волн, интерферирующих в условиях эвристических законов Кельвина о групповой структуре свободных трохоидальных волн, что существенно затрудняет поиск геометрических решений по улучшению локальных участков формы корпуса. Потому наиболее эффективным, хотя и трудоемким процессом оптимизации судовых обводов является последовательное рассмотрение профилей вновь зарождающихся и интерферирующих вблизи корпуса корабельных волн определенной длины, выбираемых из всего спектра волнообразования на заданной скорости хода судна. Это позволяет визуально выявлять участки корпуса с аномально высокой амплитудой излучения конкретной корабельной волны, и после локальной деформации формы корпуса, либо снизить местное волнообразование, либо обеспечить интерференционное гашение интенсивности отрывающейся от корпуса волны.

В физической интерпретации интеграла Мичелла обоснована единая природа корабельного волнообразования и силового воздействия на корпус корабля со стороны штормового волнения (рис. 32). В этом случае поиск оптимальной для штормового плавания формы корпуса корабля сводится к минимизации корабельного волнообразования для всех скоростей хода, включая закритически высокие, и для всех посадок (*осадки, дифферента и крена*), которые судно может

принимать в процессе штормовой качки. Тогда оптимальная форма корпуса приобретет веретенообразную форму, с косыми подрезами киля под форштевнем и ахтерштевнем, с обязательным заострением надводных ватерлиний в оконечностях.

Но все же, ко всем расчетным результатам следует относиться очень настороженно, так как теория Мичелла построена на допущениях «узкого судна» с относительно большой осадкой, что формально делает решение двумерным, не учитывающим вертикальных составляющих трехмерных потоков вблизи корпуса корабля. Сложными для расчетов представляются участки корпуса с пологими батоксами, тупыми или бульбовыми ватерлиниями, что требует экспериментальной поверки всех проектных решений о форме корпуса в опытовом бассейне и в свободном плавании самоходной модели различными курсами относительно интенсивного волнения. На экспериментальном этапе должны отрабатываться скуловые обводы корпуса, отвечающие за минимизацию килевой качки и стабилизацию потока в районе движителей; минимизироваться надводные объемы в оконечностях с позиций достижения наилучшей ходкости и безопасности плавания в условиях интенсивного штормового волнения и ураганного ветра; решаться другие вопросы наилучшей мореходности с позиций хорошей морской практики.

Важнейшим фактором, влияющим на форму корпуса и общекорабельную архитектуру, является также технологическая и экономическая обоснованность реализации сложных криволинейных обводов при изготовлении набора и обшивки корпуса. Можно предположить, что отсутствие плоских участков в обводах корпуса положительно скажется на устойчивости бортовой обшивки при ударном воздействии штормовых волн, что в целом приведет к повышению прочности и позволит уменьшить общую массу корпуса[35] судна.

[35] *Решение всех перечисленных задач пока не поддерживается правилами Морского регистра России*

IV. Проработка перспективных проектов кораблей повышенной мореходности

Древним корабелам-мореплавателям приходилось уделять существенно большее внимание безопасности штормового плавания, так как гребные весла непригодны в качестве движителей даже при умеренном волнении, а сильный шквальный ветер превращает парусное вооружение в источник серьезной опасности. Современное судно при надежной работе главных двигателей и рулевого управления может противопоставить морской стихии мощность своих машин, тем самым снижая требования к штормовой мореходности, обеспечиваемые ранее за счет непротивления или пассивного снижения силового воздействия на корпус и надстройки корабля со стороны штормовых волн и ураганных ветров.

По выражению Томаса Джилмера [1984]: «Проектирование кораблей часто считают искусством...». Далее он продолжает: «... значение его как искусства недооценивается лишь теми конструкторами, воображение и творческая мысль которых ограничены...». Трудно отрицать такую мысль. При проектировании судовых обводов такое искусство будет актуальным вплоть до появления методов вычислительной оптимизации, учитывающей не только ходкость корабля на спокойной воде, но и весь комплекс вопросов штормового плавания на взволнованной поверхности моря. В настоящее же время удовлетворительных оптимизационных решений как в задаче о ходкости, так и в задаче о мореходности пока не обнаруживается. Пока нет надежных гидродинамических решений даже для поверочных расчетов по заданной форме корпуса, и не только в случае плавания на волнении, но даже и на спокойной воде.

Латинское слово «*projectus*» буквально означает – «*брошенный вперед*», что в техническом творчестве является поиском новых инженерных решений или созданием качественно новых технических объектов. Так же как и во времена возрождения Русского океанского флота во второй половине XIX века при адмирале И. А.Шестакове, инте-

реснее было бы рассматривать вопросы проектирования новых кораблей с позиций хорошей морской практики, подразумевающей, по крайней мере, наличие плавценза у авторов новых или нетрадиционных решений по улучшению мореходных качеств корабля. А потому будут исключены из рассмотрения привычные методы «проектирования от прототипа», которые не могут соответствовать истинной сути термина «проектирование», так как невозможно «латанием старых прорех» получать качественно новые решения по достижению оптимальной мореходности кораблей.

Создание нового корабля образуется тремя ключевыми этапами проектных работ, составляя эскизное, техническое и рабочее проектирование. Каждому из этапов соответствуют конкретные проработки концептуальных решений или рабочих чертежей и спецификаций, частные детали которых определяются как традициями кораблестроительных предприятий, так и особенностями планирования работ главными конструкторами проектов новых кораблей. Качество таких поисково-исследовательских работ всецело зависит от творческих способностей ученых и инженеров, участвующих в проектировании. Но всё же, можно попробовать определить общие вопросы, составляющие минимум *необходимых проектных условий*, последовательное рассмотрение которых позволило бы разрешить множество противоречивых требований к перспективному кораблю.

Настоящее исследование основано на концепции целевого непротиворечивого проектирования корабля, сформулированной и обоснованной при поиске оптимальных кораблестроительных решений в диалоге согласия с естественной динамикой океана, в инженерном согласовании режимов плавания судна в открытом море по заданному предназначению в условиях непротивления силовым воздействиям со стороны штормовых волн и ветра. Рассматриваются звенья обоснований среднего (центрального) уровня проектных изысканий, обобщенных в рамках троичной матрицы, как специальной блок-схемы поискового анализа в направлении «сверху вниз», где определяются и поверяются ключевые проектно-технические решения в независимых междисциплинарных связях хорошей морской практики и математи-

ческой оптимизации формы корпуса и общекорабельной архитектуры для перспективных судов повышенной мореходности.

Эксплуатационная эффективность определяется способностью судна выполнять поставленные задачи в характерных для географического региона условиях штормового и ледового плавания. Современные экспериментальные и опытовые исследования в области гидромеханики корабля способны опираться на штурманский опыт активного штормового маневрирования, изначально связанного неписанными законами хорошей морской практики.

Поверочная или заключительная часть проектных изысканий может включать всестороннюю отработку наставлений мореплавателям, с определением эффективных режимов плавания и тщательным анализом опасных ситуаций и действий экипажа во внештатных и аварийных условиях ведения морских работ, всегда отличающихся технологической сложностью и высокой наукоемкостью. Успешные результаты морских изысканий сводятся к специальным разделам по эффективному управлению судном в наставлениях мореплавателям, а неприемлемые заключения обязательны к учету при комплексном пересмотре обводов, общекорабельной архитектуры и технического оснащения новых перспективных проектов кораблей и судов.

Такие наставления мореплавателям локализуются географическими особенностями района плавания, и традиционно относятся к ведению капитанов-наставников, обладающих многолетним цензом безаварийного плавания в конкретных морских акваториях, и которым доступны по подчинению административно-технические ресурсы для экспертной и практической (опытовой) проработки конкретных действий экипажа при проведении морских работ и действий во внештатных и аварийных ситуациях на море. Штурманские научно-инженерные изыскания имеют неоценимую пользу при согласовании проектных заключений для новых перспективных судов, единственно обоснованных с позиций морской практики. Экспертный опыт мореплавателей может быть формализован в качестве целевых функций для достижения наивысшей производственной эффективности судна – специализированного морского инженерного сооружения, как на эта-

пах его проектирования и постройки, так и в последующей эксплуатации под ответственностью тех же капитанов-наставников региональных морских служб.

Исследования мореходных и эксплуатационных качеств для действующего флота не менее актуальны и востребованы в обеспечении эффективности морских работ и каботажных коммуникаций, и особо в планировании модификации и постройки нового флота и морской инфраструктуры в целом. «Морская практика без теории – пагубна; морские науки без практики – бесплодны».

О постановке задачи непротиворечивого проектирования

Проектирование, как наука о создании сложных технических сооружений, всегда оперирует частными инженерными решениями, что свидетельствует об отсутствии «достаточных условий» для поиска единственно верного или абсолютно оптимального проектного заключения. Это означает, что в проектировании почти всегда присутствуют элементы творчества, элементы непознаваемого авторского замысла.

Рассматривая корабль как единую и сложную инженерно-техническую систему, приходится также отмечать и отсутствие математически строгих формализаций или каких-либо других количественных критериев для постановки оптимизационной задачи о наилучшей форме корпуса и общекорабельной архитектуре. Именно это и означает, что мореходные качества корабля зависят от *искусства проектирования*, в котором, кроме строгих технических наук и формальной логики, необходимо также широкое использование практического опыта судовождения, в том числе и в сложных навигационных условиях эксплуатации кораблей и судов и заведомо маломореходных морских сооружений специального назначения.

Целевое проектирование и поверка на непротиворечивость всех найденных проектных решений формализуются с помощью двух взаимнообратных логических матриц (троичных иероглифов), разделяющих этапы комплексного изучения проблемы и согласования требо-

ваний к кораблю как к сложной и единой инженерно-технической системе.



***Рис. 1. Логическая матрица в форме троичного иероглифа поискового проектирования схеме «сверху-вниз»**: от обобщенных теоретических предпосылок к частным инженерно-техническим решениям. Столбцы матрицы попарно связаны исторически поверенными решениями задач морской практики (слева) и современными достижениями в области корабельной гидромеханики (справа). По строкам образуются уровни этапов адаптации инженерных решений в ограничениях технологических возможностей судостроения, изначально адаптированных к региональным условиям для достижения эффективности мореплавания в сложных, штормовых и ледовых условиях дальневосточных морей.*

Последовательность этапов образует направление исследований, формально определяемых как методы проектирования «**сверху–вниз**» (*от общих требований к кораблю к частным техническим решениям по его конструкции*), и «**снизу–вверх**» (*от доступных технологических возможностей к оптимальному по назначению проекту корабля в целом*).

Комплексное решение задачи непротиворечивой оптимизации возможно в том случае, если удовлетворены все требования к кораблю

как на проходе по логическим этапам «сверху–вниз», так и в строго обратном направлении «снизу–вверх».



Рис. 2. Обратная матрица *формализует синтез заключений мореплавателей в поверочном комплексе проектных оценок в направлении «снизу-вверх»: от множества инженерных новаций - к технической эффективности и экономической оптимальности судна в конкретных навигационно-географических условиях. Как результат – возникает вопрос о техническом совершенстве нового судна, разрешаемый в контексте согласования всего комплекса наставлений мореплавателям.*

Вариант проектирования нового корабля по принципу «снизу–вверх» (рис.2) традиционно используется при небольшом изменении тактико-технических характеристик или мореходных свойств хорошо зарекомендовавших себя кораблей или их серийных проектов. Фактически же это означает усовершенствование некоего «прототипа», а весь комплекс инженерно-конструкторских работ обычно сводится к поиску экономичных или технологичных вариантов постройки корабля, отработке оптимальных вариантов установки нового судового оборудования и, при необходимости, экспериментальному опробованию небольших новаций по управлению кораблем в сложных и осо-

бых условиях плавания. Корабль является настолько сложным инженерным сооружением, что этап проектирования «снизу-вверх» в полной мере присутствует даже при закладке многократно повторяемого серийного образца, что связано с естественным совершенствованием, как кораблестроительных технологий, так и с обновлением судовых механизмов, навигационного оборудования и условий судоходства на международных морских путях.

На этапе проектирования «снизу – вверх» всегда отрабатываются наилучшие или оптимальные проектные решения, которые соответствуют современному состоянию кораблестроительных наук и технологий.

Но все же принципиально новые или нетрадиционные корабли могут появиться только исходя из принципов проектирования «сверху – вниз», когда из общих проектных предпосылок или ничем не подкрепленных пожеланий мореплавателей делается попытка найти конкретные технические решения и согласовать даже самые немыслимые технологические и будущие эксплуатационные противоречия, сохраняя при этом все принципы «хорошей морской практики» и не усложняя безмерно кораблестроительные технологии или условия эксплуатации будущего корабля.

Из анализа мореходных качеств исторических кораблей можно сделать вывод о существовании своеобразного системного подхода, связанного замкнутой системой проектного анализа инженерно-технических решений и эксплуатационных требований к всепогодному кораблю, которые ныне воспринимаются только как комплекс забытых или «неписаных» правил «хорошей морской практики». Полагая, что проектные противоречия могут быть замкнуты в троичном логическом базисе, основанном на задачах (как глаголах) и решениях (как существительных), или в логическом пространстве этапов проектирования как «времени»–«существования» и «пространства»–«явления», в которых отражаются эксплуатационные требования и технологические возможности при создании нового корабля.

На этапах эскизного проектирования корабля, при разработке законченных инженерно-технических решений и на последующей

опытной эксплуатации нового корабля вновь и вновь необходимо рассматривать аналогичные по структуре и составу проектные матрицы, что позволит согласовать все технические решения и задачи эффективного использования корабля в течение всего срока его службы.

В обобщенном виде элементы проектирования сложных инженерных систем могут быть формализованы в виде трехмерного логический базиса, оси которого станут служить проекциями для отметки выполнения основных инженерно-технических задач и по которым возможен контроль *непротиворечивости проектных решений* в целом, и в том числе по форме корпуса и связанной с ней общекорабельной архитектуре. По аналогии с построением сложных вычислительных экспериментов в корабельной гидромеханике, в качестве базисных осей проекта могут быть выбраны независимые друг от друга логические направления проектных исследований, которые формально могут быть связаны следующими терминами:

1) «**время**» как наука управления кораблем в сложных или в штормовых условиях плавания, основные положения которой должны неукоснительно соблюдаться либо чисто техническими средствами, либо строгими навигационными наставлениями по эффективному управлению кораблем и безопасности мореплавания;

2) «**пространство»,** или способность активного существования корабля в заданном физическом окружении, что в реальности соответствует тому обширному кругу морских задач, боевых или коммерческих операций, которые корабль обязан выполнять в любой, даже в самой сложной навигационной обстановке, при частичных повреждениях корпуса и аварийных поломках судового оборудования;

3) «**проект»,** или обобщенные инженерно-технические задачи, реализованные в конструкции и техническом вооружении корабля, технологических решениях при его строительстве и условиях эксплуатации, в навигационном обеспечении и поддержании ремонтной базы, возможностях обновления или модификации судового оборудования.

Может быть, для исторического анализа конкретного класса океанских кораблей применение троичного базиса выглядит несколько

искусственным. Но эта матрица может объяснить разнообразие проектных решений, принимаемых корабелами различных стран, прежде всего, если принимать в рассмотрение основное предназначение корабля (п.3), условия его плавания (п.2) и особенности эксплуатации флота конкретной страны (п.1).

Если целью оптимизации выбрана стабилизация корпуса корабля при плавании в условиях интенсивного морского волнения, то на примере анализа технических решений по принципу «сверху – вниз», проектирование корабля может быть разделено на три последовательных этапа исследований:

1 этап. **Скалярный**. Определяется основное назначение или тип корабля, который описывается «линейным» набором (перечислением) требований. Такие требования редко бывают непротиворечивыми.

2 этап. **Векторный**. Каждое из требований к кораблю формализуется внутри своеобразного проектного базиса, в котором каждое направление исследований является независимым, математически–ортогональным. В зависимости от этапа проектирования (или типа корабля) базисные направления могут быть различными. Так, в случае поиска непротиворечивых решений для корабля повышенной штормовой мореходности базисными направлениями могут стать:

2.1. Ходкость, в том числе на волнении;

2.2. Стабилизация при плавании и маневрировании на волнении;

2.3. Безопасность мореплавания в штормовых условиях и в аварийных ситуациях, в том числе при повреждениях корпуса.

На векторном этапе исследования остаются взаимозависимыми, и главной целью логического проектирования является качественная оценка этой зависимости.

3 этап. **Тензорный** (*матричный*). Здесь уже не разрабатываются новые технические решения, но анализируются по формальному признаку проработанные на втором, векторном этапе. Выстроенные в виде троичной логической матрицы новые технические решения должны допускать «операцию обращения», по форме похожую на обращение математической матрицы.

Если обратная матрица существует и сохраняет логическую связь между проектными элементами, то весь комплекс новых технических решений снова формализуется в виде скалярной точки отсчета и обратного логического базиса, задающего направления векторного анализа «снизу вверх»: от имеющихся научно-технических и технологических возможностей к оптимальному кораблю по условиям эффективности, экономичности и безопасности штормовой эксплуатации.

При возврате к исходному уровню скалярный этап становится тензорным, допускающим **анализ достаточности принятых в самом начале решений:** удовлетворяют ли полученные новые проектно-технические решения основному предназначению нового корабля?

Так получается, что на начальных этапах проектирования по пути «сверху вниз» имеются только **необходимые предпосылки** для поиска непротиворечивых решений о новом гипотетическом корабле повышенной штормовой мореходности, наиболее приоритетными из которых могут быть признаны: ходкость и стабилизация корпуса на интенсивном волнении при безусловном обеспечении безопасности мореплавания. Методически и инструментально независимыми направлениями проектных исследований можно выбрать: изучение исторического опыта мореплавания и неписаных правил «хорошей морской практики»; поверка новых и ключевых технических решений эвристического характера с помощью современных математических моделей и ранее выполненных исследований мореходности; проведение сравнительных и специализированных опытовых экспериментов с моделями судов, результаты которых могут быть использованы для формирования конкретных инженерных решений о формировании общекорабельной архитектуры нового корабля. При разделении каждого направления на три группы последовательно решаемых задач будет сформирована искомая троичная матрица, совместная разработка элементов которой образует процесс непротиворечивого проектирования нового гипотетического корабля.

По завершению проектного этапа возникает концептуальное построение нового корабля, который можно охарактеризовать как нетрадиционный в целом или в основных элементах его архитектуры. В

этом случае становится актуальным столь же комплексный поверочный анализ принятых технических решений с эксплуатационных позиций, по результатам которого возможно заключение об оптимальности нового проекта корабля: его эксплуатационной и экономической эффективности.

В зависимости от класса и назначения корабля выбирается метод исследования основных элементов будущего корабля, образующих единую систему согласованных инженерно-технических решений. В любом случае при проектировании судна детально изучаются следующие вопросы:

- *принятие решения о форме корпуса корабля и особенностях общего расположения судовых механизмов и помещений, предварительное изучение особенностей ходкости, остойчивости, непотопляемости, штормовой мореходности и безопасности плавания нового судна;*

- *распределение нагрузки и соотношения весов вдоль корпуса и по уровням палуб, удифферентовка и определение соотношений между судовыми запасами, полезной нагрузкой и вместимостью судна, согласование вариантов и минимизация объемов балластировки при различной эксплуатационной нагрузке судна;*

- *отработка вопросов ходкости и качки судна в условиях штормового волнения, согласование методов борьбы за живучесть судна в аварийных ситуациях, в том числе при остановке машин в штормовых условиях;*

- *повторное уточнение формы корпуса и общекорабельной архитектуры, достаточное для проведения проектных расчетов остойчивости, плавучести и непотопляемости в различных режимах плавания, в том числе в аварийных ситуациях и при затоплении отсеков корпуса судна;*

- *принятие заключений о конструктивных особенностях корпуса судна, о типе и расположении главных двигателей, об управляемости в различных условиях эксплуатации, об удовлетворительной обитаемости в штормовых условиях плавания.*

Требования к проектированию иногда усложняются дополнительными задачами, как обеспечение ледового плавания или необходимость учета особенностей использования судна в военное время, иной раз предусматривается возможность переоборудования судна для изменения его назначения.

Испытания моделей в Калининградском мореходном училище

Первые эксперименты с моделями судов с уменьшенными моментами инерции площади действующей ватерлинии выполнялись в 1975-1976 годах на судоводительском отделении Калининградского мореходного училища, с испытанием моделей в малом опытовом бассейне лаборатории теории и живучести корабля.



***Рис. 3. Модель корпуса судна с уменьшенными моментами инерции действующей ватерлинии (МИДВ)**, по форме близкая к рыбе-паруснику, с носовым бульбом и плавниковым ахтерштевнем. Фотография сделана в кабинете девиации магнитного компаса судоводительского отделения Калининградского мореходного училища (1976 г)*

Задача на проектирование формы корпуса была поставлена начальником судоводительского отделения Г. С. Маленко и состояла в поиске методов обеспечения безопасности морских погрузо-разгрузочных работ, ежедневно осуществляющихся в морских экспедициях среднетоннажного рыболовного флота. Предлагалось рассмотреть вариант округлого в средней части корпуса с завалом надводного борта, что обеспечивало бы безопасную швартовку в открытом море, а также совместное маневрирование судов в условиях умеренного морского волнения и свежего ветра. Морскими офицерами – преподавателями Калининградского мореходного училища, в качестве прототипов указывались корабли и суда конца XIX – начала XX веков.

Таким образом в построении формы корпуса и обводов корабля повышенной штормовой мореходности выбраны воистину инженерные шедевры: это известные исторические миноносцы типа «Стерегущий», проходившие испытания на штормовых мерных милях; или крейсера, подобные «Варягу», «Аскольду», «Авроре», и, конечно же, парусники эпохи Великих географических открытий.

Среди несомненных соавторов проекта новой формы корпуса корабля, принявших активное участие в обсуждении ее мореходных качеств и результатов модельных испытаний, следует назвать преподавателей судоводительского отделения Александра Алексеевича Камышева (рис.4) и Далена Янгелевича Бронштейна, а также курсантов однокурсников группы С-75 Валентина Богачева, Николая Нечаева, Сергея Лапкова и Сергея Борисова.

В проектировании формы корпуса требуемые свойства были усилены до крайности. Ориентиром служила рыба-парусник, которая по наблюдениям в открытом море демонстрировала очень малое волнообразование и высокую стабильность своего тела при плавании на взволнованной поверхности моря. В кормовой части модели устраивался тонкий плавниковый ахтерштевень, что также соответствовало форме хвостового плавника рыбы-парусника.



***Рис. 4. Александр Алексеевич Камышев** ведет практические занятия с курсантами Калининградской мореходки в том же кабинете «девиации магнитного компаса». На флоте приветствуются научно-технические поиски будущих мореплавателей*

Визуальные наблюдения за свободным плаванием и ходом по инерции первой модели корпуса МИДВ подтвердили правильность принятых проектных решений о форме корпуса в целом. Модель пассивно реагировала на волнение и показывала необычно

высокие ходовые качества даже на закритически высоких скоростях хода. Корпус модели не получал динамического дифферента, а при его движении на большой скорости за кормой оставалась исчезающе малая или почти незаметная поперечная корабельная волна. Среди недостатков корпуса отмечалось оголение кормового подзора на высокой скорости хода, что, как полагалось, может создать неблагоприятные гидродинамические условия для работы винто-рулевого комплекса.

Рекогносцировочные оценки мореходности малой модели МИДВ

В период с 1976 по 1980 год (*Калининград-Севастополь-Ленинград*) было изготовлено и испытано еще несколько малых моделей судов с малой инерцией площади действующей ватерлинии, форма корпуса которых строилась в компромиссных вариантах, допускающих потенциальную возможность использования на реальных судах с такими же обводами. Однако ни показательно положительных, ни заведомо плохих результатов экспериментов с этими моделями получено не было. То есть для получения обоснованных результатов, приемлемых в практическом проектировании кораблей и судов кустарные методы уже не давали ничего качественно нового, необходимы были более глубокие и научно обоснованные исследования.

На новом техническом уровне продолжались на кафедрах гидромеханики и теории корабля кораблестроительного факультета Ленинградского кораблестроительного института. Приоритетным считалось изучение вопросов гидродинамической стабилизации корпуса при его движении на свободной поверхности с различными скоростями хода, для чего строились и проводились вычислительные эксперименты по волнообразованию с аналитически определяемыми обводами корпуса. Чисто теоретических результатов получено не было, и разработки математического обеспечения были переведены на второй план, а дополняющие опытовые эксперименты – в вычислительные.

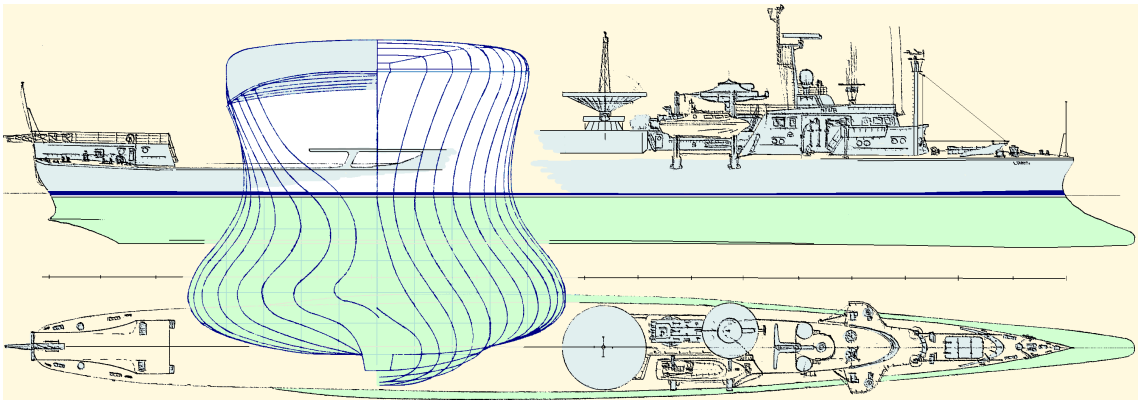


***Рис. 5. Проекция «корпус» теоретического чертежа** и эскиз общекорабельной архитектуры быстроходного корабля с уменьшенными моментами инерции площади действующей ватерлинии.*

Новая маломерная опытовая модель МИДВ была изготовлена в 1980 году, при этом обводы корпуса снова задавались по прототипу рыбы-парусника, с эскизной прорисовкой общего расположения быстроходного корабля, способного выполнять морские океанографические работы в штормовых условиях (рис.5). На вертикальном плавниковом ахтерштевне корабля было устроено «горизонтальное крыло», которое должно было стабилизировать поток и не допускать оголения винто-рулевого комплекса на больших скоростях хода и при движении на волнении.

Впервые все шпангоуты на теоретическом чертеже корпуса модели МИДВ были прорисованы так, чтобы касающиеся их ватерлинии проходили почти эквидистантно (рис. 5), что, как считалось, будет соответствовать обводам биологического прототипа (*как позже выяснилось, это решение было ошибочным*).

При пробных буксировках модели на спиннинге в реке было получено подтверждение выполнения требования по стабилизации потока в районе движителей на всех скоростях хода. Однако выбор оптимальной скорости, на которой поперечная волна за кормой модели будет минимальной, был почти безуспешным, хотя на средних скоростях хода действующая ватерлиния модели искажалась на приемлемо малую величину.

Рекогносцировочные эксперименты проведены в опытовом бассейне Ленинградского кораблестроительного института (рис.6). В испытаниях участвовала также и вторая модель с традиционным корпусом, примерно такого же размера, что позволило сравнить результаты визуальных наблюдений за волнообразованием и сделать предварительные оценки ходовых качеств новой формы корпуса.

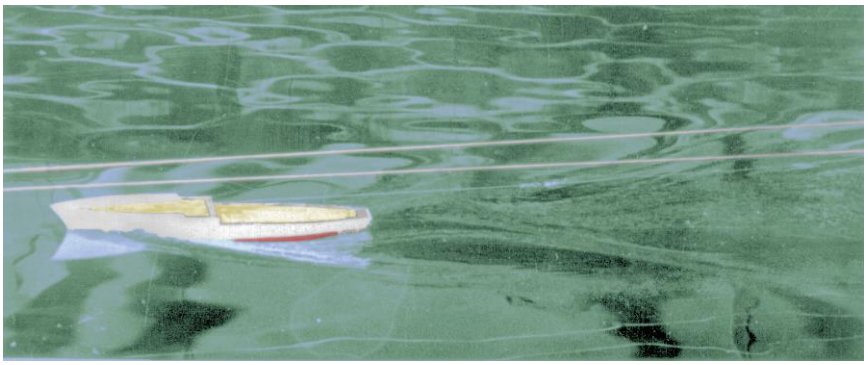


Рис. 6. Рекогносцировочные опытовые испытания модели МИДВ.

Буксировка столь маломерных моделей осуществлялась с помощью специально изготовленной уздечки, которая позволяла опустить точку приложения сил тяги на уровень палубы этих моделей. Минимальная тяга, которая могла быть задана в буксировочной системе опытового бассейна, позволяла проводить модели со слишком высокой скоростью, не менее чем Fn = 0,5, однако и это вполне удовлетворяло целям рекогносцировочных опытов.

Неожиданным выводом из рекогносцировочных испытаний явилось обнаружение факта, что модель МИДВ с крыльевыми образованиями на ахтерштевне, при движении с высокой скоростью хода Fn ≈ 0,5, теряет остойчивость, кренится и уходит с мерной линии опытового бассейна. На фотографиях видно, что в носовой части модели МИДВ образуется ярко выраженная расходящаяся корабельная волна, которая свидетельствует о неудачном построении скуловых шпангоутов. Однако в опытовом бассейне не представлялось возможным провести испытания волнообразования на различных скоростях хода, и поэтому обнаруженный негативный фактор не был принят во внимание при проектировании новой более крупной опытовой модели гипотетического судна.

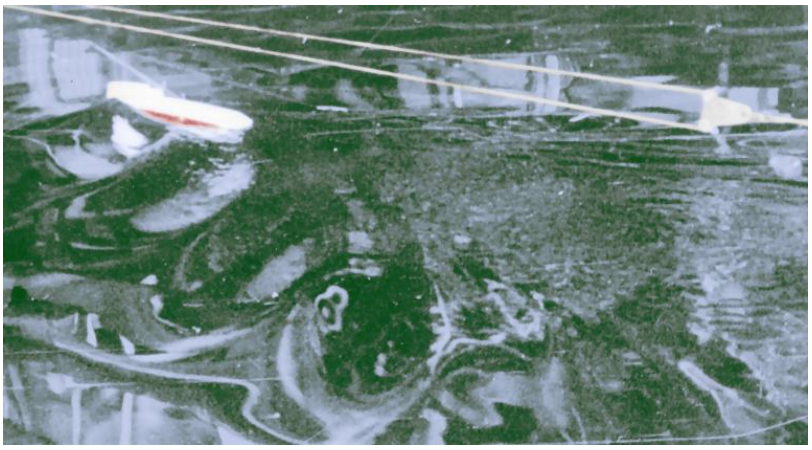


Рис. 7. Асимметрия корабельного волнообразования *при потере остойчивости и уходе модели МИДВ с мерной линии опытового бассейна.*

Дополнительные опробования в открытых водоемах также не давали возможности объективно оценить влияние формы скуловых обводов корпуса, к тому же модель показывала возможность выбора оптимальной скорости, на которой корабельное волнообразование заметно минимизировалось. Всякие опыты с моделями с заостренными ватерлиниями всегда показывали их высокую чувствительность к высоте крепления буксирной нити, модели сильно дифферентовались на больших скоростях хода, что сильно затрудняло оценки особенностей их корабельного волнообразования. Но всё же, наблюдения за поведением небольших моделей МИДВ на волнении подтверждали хорошие мореходные качества, такие как умеренность качки и устойчивость движения по инерции без ходового дифферента.

Вторая модель с традиционными обводами (рис. 8), с острыми углами входа ватерлиний, образующими вертикальный «плавниковый» форштевень, с ватерлиниями, переходящими в округлые скуловые обводы, обеспечивающие «закручивание» набегающего потока под днище. Широкая транцевая корма с плоским подзором удерживала корму прижатой к поверхности воды и обеспечивала стабилизацию потока в районе движителей. Теоретический чертеж традиционной модели был похож на первый вариант формы корпуса траулера, показанного в заключительной главе, но с более полным корпусом и ярко выраженными «плавниковым» форштевнем и округлыми скулами.

Традиционная модель не проявляла никаких необычных или негативных мореходных качеств. Именно эта модель ярко показывала хорошую обтекаемость и умеренно малое корабельное волнообразование в носовой части корпуса на всех скоростях хода. Основным достоинством обводов этой модели являлось **отсутствие ходового дифферента на больших скоростях хода**, то есть модель, разгоняясь, не образовывала перед собой волновой «горы», а ее корма заметно подвсплывала под напором потока из-под днища. Однако, при визуальных наблюдениях за поведением модели на волнении в открытом водоеме, она, как и обычное судно, демонстрировала активную качку на малой волне, неустойчивость курса и быстрое гашение хода в движении по инерции. Тем не менее, можно предположить, что при работающих движителях ход аналогичного судна на волнении будет вполне стабильным.

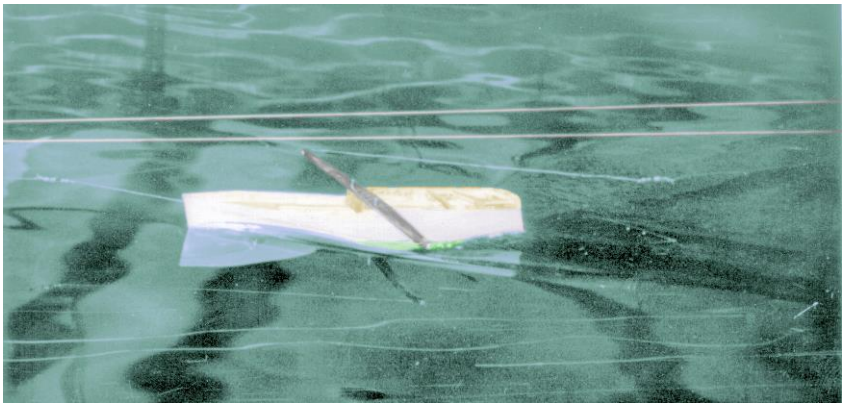


Рис. 8. Испытание волнообразования *модели с традиционными обводами, с острым форштевнем и широкой транцевой кормой*

Построение опытовой модели МИДВ

Ко времени принятия решения о проведении сравнительных испытаний в опытовом бассейне гравитационного типа в 1985 году уже был представлен развернутый доклад по секции кораблестроения Советского научного общества истории философии, естествознания и техники (СНОИФЕТ), где представлялись основные положениями «Технико-исторического анализа мореходности», а в вычислительном центре Ленинградского кораблестроительного института была проведена серия численных расчетов волнового сопротивления с аналитическими моделями формы корпуса корабля, по результатам которых

были сделаны оценки основных элементов оптимизированного корабля.

Изготовление экспериментальной модели и проведение сравнительных экспериментов в опытовом бассейне проходило под руководством профессора кафедры теории корабля А. Н. Холодилина. Главной задачей экспериментальных исследований ставилось подтверждение (или опровержение) выводов технико-исторического анализа мореходности.

Актуальность экспериментального изучения штормовой мореходности исторических судов и сопоставление результатов с современными проектными решениями по форме корпуса океанских судов обосновывалась необходимостью анализа причин гибели в штормовом плавании контейнеровоза «Механик Тарасов», а также обсуждавшимися в прессе выводами о незащищенности английского эсминца «Шеффилд», который на умеренном волнении не смог отреагировать на авиационную атаку в Фолклендском конфликте.

В качестве проектной последовательности получения теоретического чертежа модели МИДВ можно показать следующую цепочку трансформаций обводов корпуса. Отталкиваясь от формы корпуса современного быстроходного водоизмещающего корабля с малым коэффициентом общей полноты и развитой (развесистой) надводной частью корпуса, делается переход к корпусу крейсера типа “Аврора”. Затем такая деформация экстраполируется на усиление - гиперболизацию особенностей обводов этого крейсера, что необходимо для более четкого выявления мореходных свойств кораблей и судов, спроектированных и построенных в конце XIX века.

Это означало более существенные изменения формы корпуса по сравнению с «Авророй»: завал бортов в районе действующей ватерлинии; заужение и заострение ватерлиний в оконечностях; уменьшение надводного и увеличение полноты подводного объемов корпуса; смещение центра величины в нос и заметное снижение высоты форштевня и площади палубы бака, которые не должны препятствовать ходкости на волнении в режиме прорезания волн.

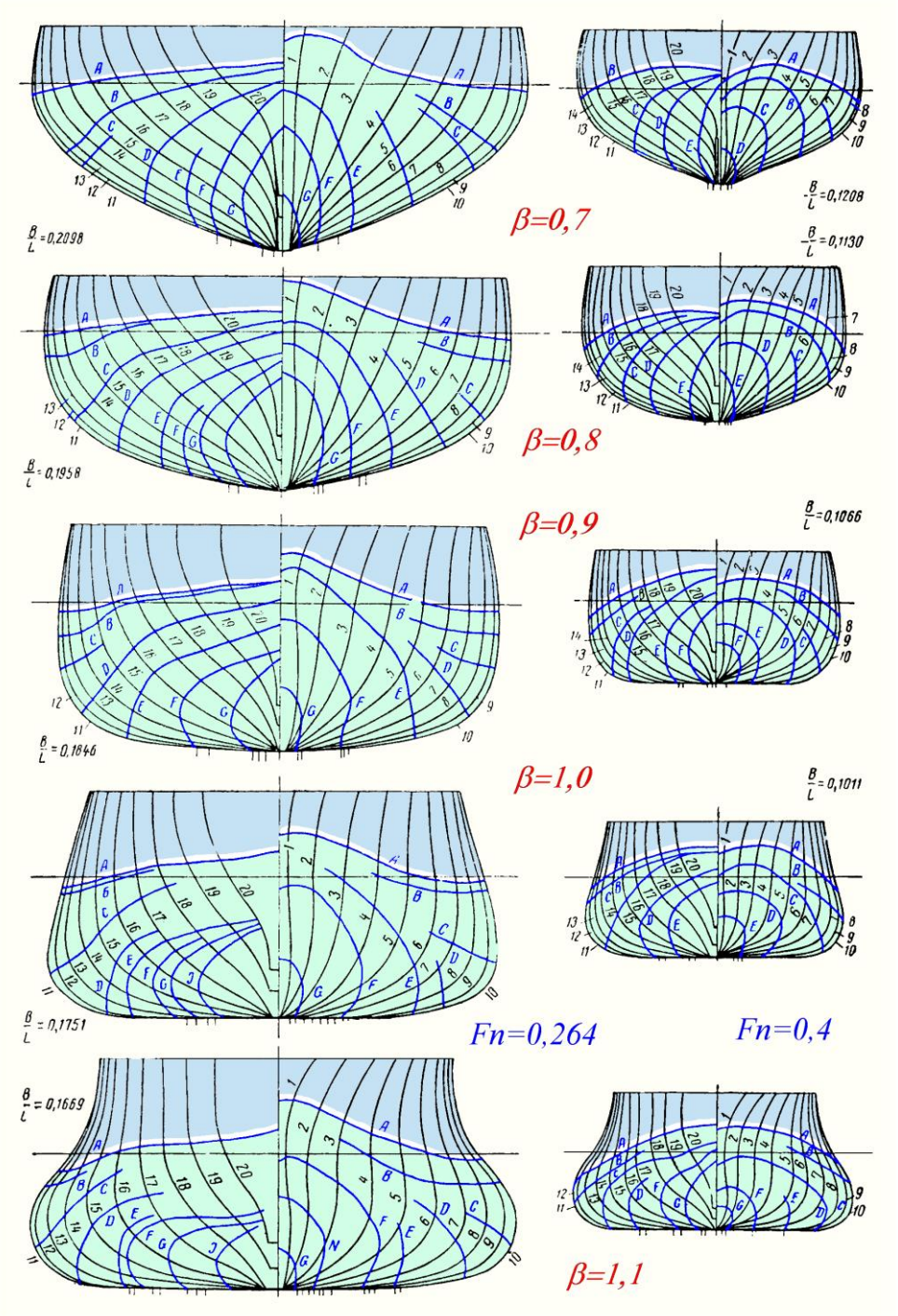


Рис. 9. Модели судов с различным коэффициентом полноты мидель-шпангоута, испытанные в составе серии «Тейлора». *Отмечены линии тока для скоростей хода Fn=0.264 – корпуса слева; Fn=0.4 – удлиненные корпуса справа*

Совершенно неверно было бы говорить о новизне постановки задачи на проведение сравнительных экспериментов с моделью МИДВ, или о том, что новый корпус обладает излишней оригинальностью. В

испытания серии «Тейлор» были включены модели с уменьшенной инерцией площади действующей ватерлинии как для полных корпусов большегрузных судов, так и для быстроходных кораблей с удлиненными корпусами [Павленко, 1953].

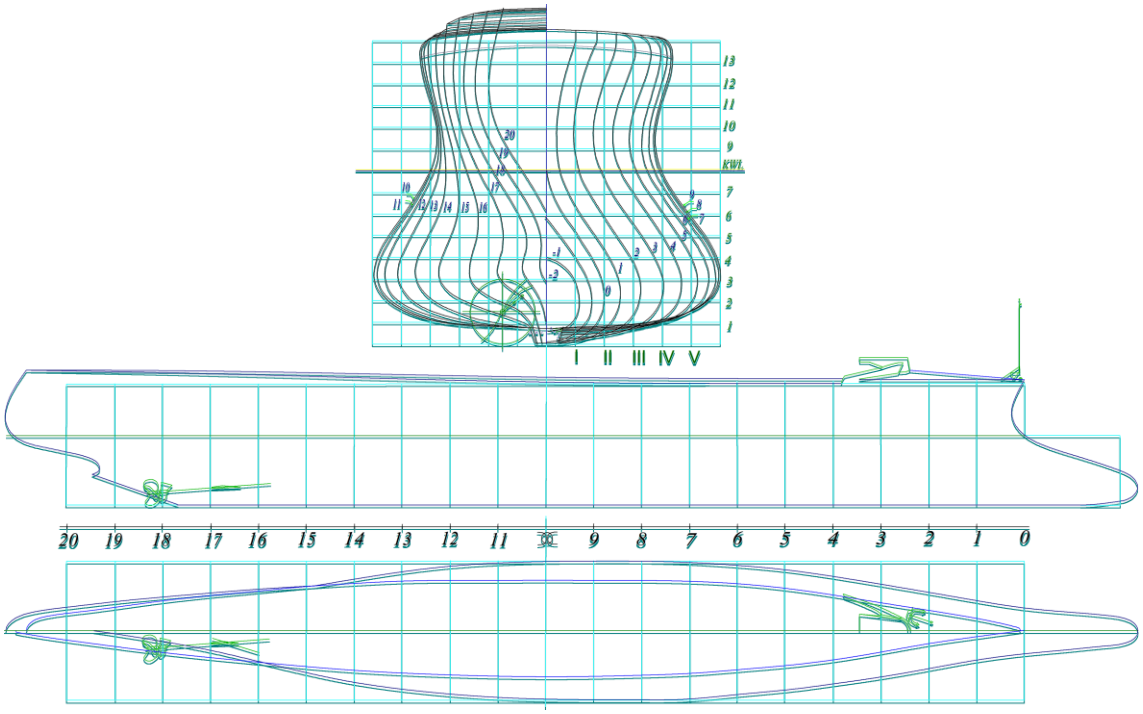


Рис. 10. Основные контуры и проекция "корпус" теоретического чертежа *модели, с которой проводились мореходные испытания в опытовом бассейне Ленинградского кораблестроительного института. Носовой бульб заглублен, а ватерлинии в его верхней части заострены, что сделано, исходя из необходимости поиска оптимальной посадки модели по ходкости на спокойной воде.*

В результате этой исторической серии опытовых испытаний был сделан вывод о том, что «модели с более полной формой мидель-шпангоута обладали очень небольшим преимуществом при повышении относительной скорости до значений, превосходивших 1,10 (Fn = 0,35), при этом остаточное сопротивление всех моделей было почти одинаковым» [Основы…, 1948]. С этим выводом можно вполне согласиться, если учесть, что испытания проводились до чисел Фруда порядка Fn = 0,5.

Относительная длина штормовых волн, с которыми необходимо уменьшить активность силового взаимодействия за счет специальной формы корпуса, существенно больше образуемых кораблем на столь

низкой скорости. Поэтому новый эксперимент планировалось провести для испытания ходкости модели МИДВ в условиях волнения и сопоставить результаты с ходкостью на тихой воде на существенно больших скоростях, вплоть до чисел Фруда порядка Fn≥ 0.8 и более.

В случае формы корпуса с завалом бортов в средней части корпуса, расчеты по формулам Мичелла показывают существенное уменьшение корабельного волнообразования именно на скоростях Fn=0.5 и более. Из чего и делался вывод о том, что завал борта в районе действующей ватерлинии (*точнее, в области воздействия на корпус штормовых волн*) будет не только стабилизировать бортовую качку, но также благоприятно скажется на ходкости в условиях умеренного и штормового волнения.

На корпусах серии «Тейлора» видно, что линии тока у корпусов с зауженной ватерлинией обладают существенно меньшей расходимостью, чем у корпусов с малой полнотой мидель-шпангоута, у которых поток воды от форштевня устремляется в основном под днище, создавая таким образом дополнительный дифферентующий момент.

На основании указанных предположений в качестве прототипа был выбран левый нижний корпус (рис. 9), который, исходя из предпосылок технико-исторического анализа, был деформирован для смещения в нос центра величины за счет развитого носового бульба (рис. 10).

Вычислительная оптимизация с использованием аналитических корпусов корабля была направлена на снижение волнового сопротивления на относительных скоростях Fn = 0,3 и Fn = 0,5. При этом на первых этапах исследований из рассмотрения был выпущен анализ хорошо известного минимума сопротивления на Fn = 0,4.

В теоретическом чертеже модели для проведения опытовых испытаний были правильно отражены проектные свойства корпуса в целом, а вот локальные обводы корпуса, чтобы усилить (не угасить) главную проектную идею, не оптимизировались даже на важных – контрольных участках бортовой обшивки. В частности, обводы носовой части корпуса остались не оптимизированными для скорости хода Fn=0.4 (не образовывали закручивания набегающего потока под дни-

ще корпуса), а кормовой подзор и раковина не создавали условий для присасывания кормы к поверхности воды на ходу корабля и соответственно не учитывали необходимость демпфирования килевой и вертикальной качки. Такая гиперболизация корпуса на изучение только его главных свойств волнообразования и взаимодействия корпуса с внешним волнением привели к тому, что в экспериментах на тихой воде ярко проявилась продольная корабельная волна, а при ходе навстречу регулярному волнению иногда отмечалась недостаточность демпфирования килевой и вертикальной качки.



Рис. 11. Испытания ходкости и волнообразования *проводятся с использованием буксировочной тележки. Модель показывает слишком большую расходящуюся волну, что скрадывает на буксировочной кривой минимум на скорости хода при Fn = 0,4*

Однако указанные выше недостатки корпуса были вынужденно необходимы по той причине, что в плане испытаний ходкости на тихой воде стоял выбор оптимальной формы корпуса в зависимости от осадки и дифферента новой гипотетической модели. Чтобы при варьировании посадки корпуса не терялись его главные гидродинамические свойства, при построении теоретического чертежа модели основные ватерлинии проводились по возможности эквидистантно. Из недостатков испытываемой формы корпуса, проявлявшихся на ходкости со скоростью Fn = 0.4, позже было обнаружено относительное ухудшение штормовой мореходности, что также явилось неплохим подтверждением принципа взаимозависимости элементов формы корпуса как при достижении наилучшей ходкости на спокойной воде, так и обеспечении хорошей мореходности в условиях интенсивного штормового волнения.

Показанная на рис. 8 модель является гиперболизованной, т.е. свойства формы корпуса несколько усилены в сравнении с перспективным проектированием реальных судов повышенной штормовой мореходности. При построении теоретического чертежа также учитывалась необходимость проведения поисковых испытаний наилучшей посадки модели по условию минимизации удельного волнового сопротивления на спокойной воде, для чего варьировались как осадка, так и дифферент модели.

Запланированный выбор оптимальной посадки по испытаниям ходкости на спокойной воде, как предполагалось, означал также определение и наилучшей формы корпуса по условиям минимизации силового взаимодействия корабля с внешним волнением (*по результатам испытаний оптимальная осадка оказалась близкой к проектной или на 1÷1.5 см меньшей)*

В случае использования гиперболизованного корпуса МИДВ в проекте реального корабля, необходимо отметить следующие его особенности:

1. Реализуется компромиссное решение с целью обеспечения остойчивости и большого раскрытия верхней палубы, допускающих возможность установки многочисленных судовых устройств;
2. Расчетная скорость хода $Fn(w) > 0.5$, при этом не идет речь о соответствующей мощности двигателей. Под $Fn(w) > 0.5$ понимается динамическое взаимодействие корпуса с морскими волнами, длина которых превышает длину корпуса корабля;
3. При достижении в экспериментах высоких скоростей хода, так же как в рекогносцировочных испытаниях малых моделей, может быть выявлено свойство потери остойчивости. То есть для реального судна необходимо дополнительное исследование остойчивости на ходу, а также изучение активных плавниковых успокоителей качки, которые смогут скомпенсировать потерю остойчивости;

4. Предполагается, что на верхней палубе будет минимум надстроек. Вводится большая погибь бимсов и скругление ширстрека, что должно обеспечить быстрое стекание с палубы набегающих волн;
5. Судовые устройства и оборудование, которые требуют внешнего обслуживания членами экипажа в открытом море, необходимо переместить внутрь корпуса или на кормовую палубу;
6. Снижение высоты верхней палубы в носовой оконечности служит для облегчения прорезания встречных волн. Устройства, расположенные на носовой палубе, люки трюмов, палубные механизмы и носовая надстройка прикрываются волноломом;
7. Заострение ватерлиний, которое сильно исказило реально приемлемую форму надводного борта, особенно в кормовой части корпуса, сделано с учетом сохранения ходкости и безотрывного обтекания при больших изменениях посадки судна. Это было необходимо, так как экспериментами предусматривалось изучение ходкости при различных величинах осадки и дифферента.

Особенности гидростатики и остойчивости

Испытываемая модель имела несколько гиперболизованную форму корпуса, что было необходимо для более четкого выделения как положительных, так и негативных особенностей мореходности новой оптимизированной формы корпуса.

На графиках кривых элементов теоретического чертежа (рис.12) хорошо видно, что даже небольшой завал бортов, приводящий к сокращению площади ватерлинии, многократно уменьшает моменты инерции площади ватерлинии, и тем самым благоприятно сказывается на снижении интенсивности силового взаимодействия корпуса корабля со штормовым волнением.

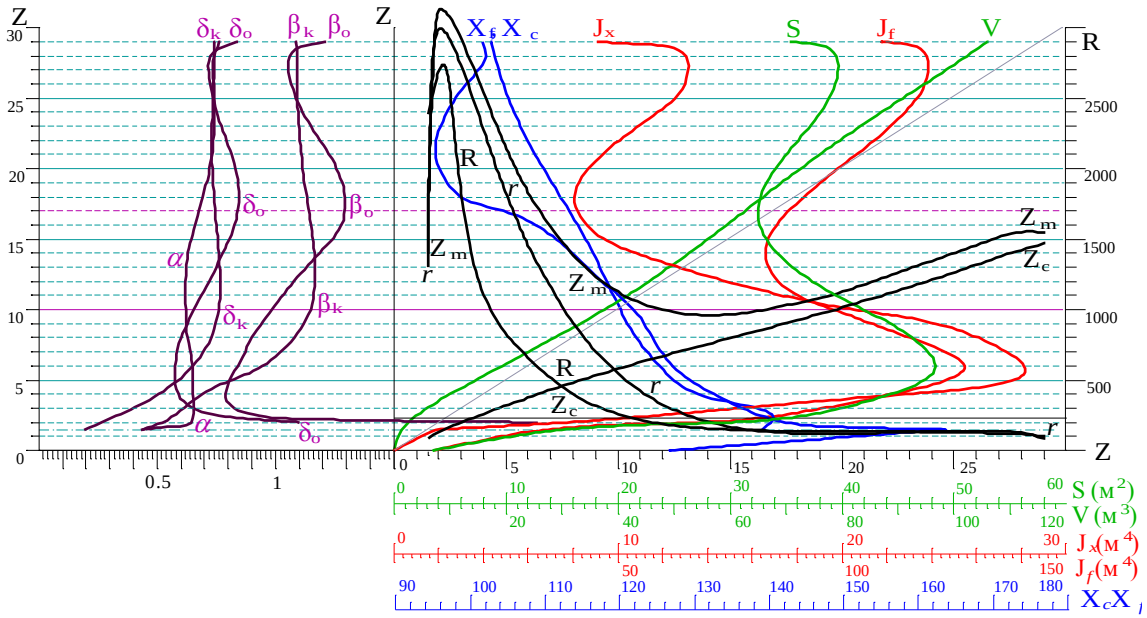


Рис. 12. Гидростатические кривые *модели судна с уменьшенными моментами инерции площади действующей ватерлинии (МИДВ)*

Остойчивость гиперболизованной модели МИДВ-85 позволяет удерживать метацентрическую высоту практически на нулевом уровне (рис.13), при этом запас остойчивости будет достаточным для безопасного плавания. Минимизация начальной остойчивости означает увеличение периода свободных бортовых колебаний корпуса, что уже само по себе стабилизирует качку при

Параметры посадки модели МИДВ
для диаграммы статической остойчивости

№ВЛ	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	КВЛ	*7*	*8*	*9*
Tсм	*0.5*	*2.5*	*6.5*	*10.5*	*12.5*	*14.5*	*16.5*	*20.5*	*24.5*
Zc см	*02*	*1.1*	*3.2*	*5.2*	*6.1*	*6.9*	*7.8*	*9.6*	*11.7*
D кг	*2.6*	*10.4*	*28.8*	*45.5*	*52.7*	*59.4*	*65.9*	*79.6*	*94.74*

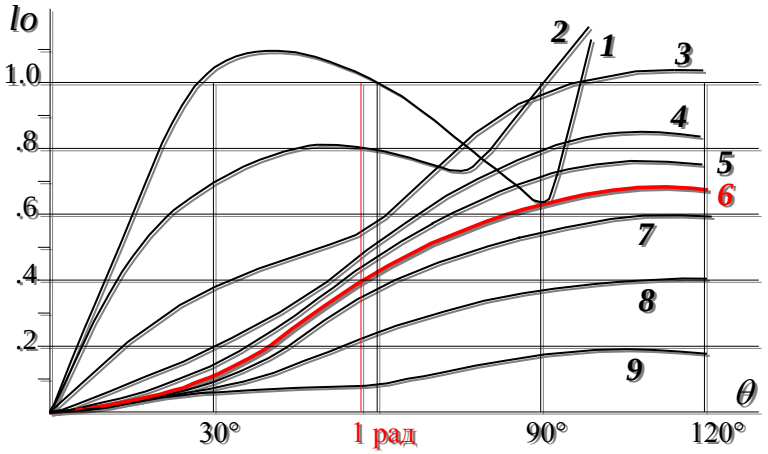


Рис. 13. Диаграмма плеч статической остойчивости формы *(Zg=Zc) для модели МИДВ. На рабочих осадках корпус имеет ярко выраженную S-образность диаграмм остойчивости.*

воздействии морских волн с меньшим периодом. Так, при испытаниях модели МИДВ в свободном плавании на волнении, когда ее остойчивость снижалась до период а бортовой качки в 6 сек, бортовая качка на волне практически полностью исчезла – корпус всегда сохранял вертикальное положение.

Максимальный период волны, генерируемой волнопродуктором опытового бассейна, не превышал величины 1,7 сек. Аналогичные режимы плавания без бортовой качки вполне реализуемы на реальных судах с уменьшенными моментами инерции площади ватерлинии и S-образными диаграммами остойчивости на осадках, покрывающих диапазон амплитуд вертикальной качки. Период штормового волнения обычно не превышает 12 сек, и если период качки будет доведен до 30 или более сек, то корабль практически нигде в мировом океане не встретит крутых и опасных волн со столь большим периодом.

Параметры ходкости на спокойной воде и на волнении

При проектировании формы корпуса модели МИДВ и построении ее теоретического чертежа были использованы качественные результаты систематических расчетов волнового сопротивления.

Основные выводы из анализа кривых удельного волнового сопротивления сводятся к следующему:

1. Необходимость заострения действующей ватерлинии в оконечностях для уменьшения удельного сопротивления при скорости хода $Fn \leq 0.3$;

2. Возможность увеличения коэффициента общей полноты за счет развитого носового бульба, с сохранением малого угла входа ватерлиний в носовой части корпуса;

3. Любая деформация корпуса, при которой сохраняется форма мидель-шпангоута и продольная полнота корпуса, мало сказывается на удельном волновом сопротивлении при скорости, соответствующей $Fn = 0.5$. К существенному снижению волнового сопротивления на этой скорости приводит уменьшение ширины и применение завала бортов в средней части корпуса, на уровне действующей ватерлинии.

Выводы о форме корпуса, имеющей наилучшую ходкость на волнении, имеют эвристический характер, так как в истории кораблестроения, по причине огромных различий между историческими и современными кораблями, нельзя обоснованно сослаться на опыт строительства кораблей, специально приспособленных к эффективному ходу в условиях морского волнения. Теоретическая оптимизация также пока не вышла за рамки расчетов ходкости на спокойной воде.

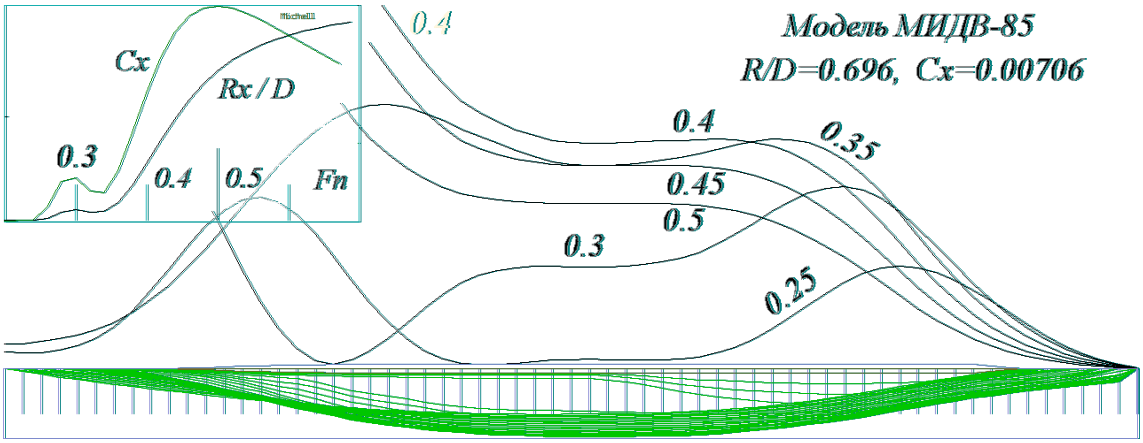


Рис. 12. Расчетное распределение энергии корабельного волнообразования *вдоль корпуса модели МИДВ для различных скоростей хода. На профилях волнообразования отмечены скорости движения модели по Фруду. Слева вверху показаны расчетные кривые коэффициента Cx и удельного волнового сопротивления Rx/D.*

Предположим, что если достигается минимум волнового сопротивления на любой скорости хода, включая Fn > 0.5, который будет проявляться в малом волнообразовании, то соответственно будет снижена интенсивность динамического воздействия на свободно плавающий корпус корабля со стороны морского волнения при любых длинах и амплитудах штормовых волн. Это может быть объяснено тем, что если форма корпуса в целом не усиливает корабельных волн, которые излучаются всеми участками судовой обшивки, то не должно происходить интенсивного взаимодействия со свободными морскими волнами. То есть любая свободная морская волна, которую пересекает движущийся корабль, не должна быть им разрушена, а после прохода через корпус корабля, такие свободные волны должны в целом сохранить свою форму.

Смещение центра величины и центра тяжести в нос будет ухудшать свойство «всхожести на волну», игнорирование которого необходимо для уменьшения килевой качки. Известно также [Л. С. Артюшков, 1983], что именно килевая качка оказывает наибольшее влияние на потерю хода в условиях морского волнения. Исходя из используемого здесь метода анализа волнового сопротивления, можно сделать выводы о механизме снижения интенсивности взаимодействия корпуса корабля с внешним волнением, когда характер движения оптимизированного корабля в условиях волнения будет определяться исключительно гидродинамикой взаимодействия носовой части корпуса с внешним волнением.

А именно, ожидается, что уменьшение интенсивности корабельного волнообразования в носовой части корабля приведет к соответствующему снижению активности воздействия на его корпус со стороны внешнего морского волнения. Для этого обводы корпуса должны иметь сильное заострение углов входа на уровне действующей ватерлинии, и большую подводную массу (инерцию) в носовой оконечности, которая может быть обеспечена за счет установки развитого бульба. Стабилизация носовой оконечности должна привести к уменьшению всех других видов качки, а при благоприятном режиме прорезания и переката волн через верхние палубы будут исключены также и опасные «захваты» корпуса крупными одиночными волнами, и вызываемые ими перенапряжения корпусных конструкций, а также – слеминг и глубокое подныривание с ударами гребней волн по скулам и палубам.

Приняв концепцию проектирования корабля со смещенным в нос центром величины (центром тяжести) подводной части его корпуса, важно выполнить также требование по существенному уменьшению площади и моментов инерции действующей ватерлинии, и в первую очередь в носовой части корпуса. Это необходимо для согласования формы обводов корпуса с особенностями управляемости движущегося корабля, в соответствии с которыми центр бокового динамического сопротивления всегда оказывается смещенным в нос, что в совокупности может способствовать уменьшению вращательных моментов,

приводящих к рысканию на курсе и килевой качке от чрезмерной всхожести корпуса на встречную волну.

Таким образом, были определены основные требования к подводной части корпуса гипотетического судна, которые должны обеспечить существенное снижение активности взаимодействия носовой части корпуса с морским волнением. Однако для полной реализации «принципа непротивления внешнему воздействию» необходимо также запрещение больших надводных объемов и излишних запасов плавучести корабля, а также недопускать развала надводного борта ни в оконечностях, ни в средней части его корпуса. Фактически же здесь сформулированы основные технические тезисы о возможности существенного уменьшения качки и улучшения ходкости корабля на волнении, обеспечиваемые за счет пренебрежения свойством «всхожести корпуса на волну», что, как затем было обнаружено в эксперименте, привело также и к существенному снижению заливаемости верхней палубы в носовой части корпуса на всех режимах и курсах движения корабля относительно интенсивного волнения. То есть уменьшение килевой качки является более эффективным средством для снижения заливаемости палубы бака в том числе.

Несмотря на гиперболизацию обводов экспериментальной модели, сделанной для более контрастного выявления особых мореходных свойств и возможных недостатков корпуса, все же, подготовленная к испытаниям гипотетическая модель вполне может удовлетворять проектным требованиям к реальному судну повышенной штормовой мореходности:

1. Удовлетворительная ходкость, как на спокойной воде, так и в условиях ураганного ветра, штормового волнения и крупной океанской зыби;

2. Улучшенная стабилизация корпуса в условиях интенсивного штормового волнения, независимо от курса и скорости хода корабля;

3. Повышенная безопасность мореплавания в любых погодных условиях, в том числе при остановленных главных двигателях.

Наиболее близкими историческими прототипами для такого гипотетического корабля могут быть признаны античные галеры с раз-

витым носовым бульбом, которые в дальних морских походах успешно штормовали при активном использовании кормовых весел-плавников.

Сравнительные опытовые эксперименты

Цель экспериментальных исследований

- Изучение характера, формы и интенсивности волнообразования при различных скоростях хода и посадке модели МИДВ;
- Исследование влияния формы корпуса на буксировочное сопротивление при изменении осадки и дифферента, а также кормой вперед;
- Проверка корректности и качественного соответствия расчетов волнового сопротивления для различных форм корпуса корабля;
- Определение дополнительного сопротивления при испытаниях модели на встречном регулярном волнении;
- Сравнение ходкости на волнении модели МИДВ и модели быстроходного судна 60-й серии с коэффициентом общей полноты корпуса $\delta = 0.592$;
- Аналогичные сравнительные испытания размаха килевой качки и ускорений в оконечностях корпуса на встречном регулярном волнении;
- Определение величины потери хода и характеристик качки на встречном волнении кормой вперед;
- Исследование ходкости и динамики качки модели на попутном волнении, и в том числе испытание режимов захвата корпуса попутной волной;
- Визуальные наблюдений за мореходными качествами и обеспечением условий безопасности мореплавания модели на регулярном волнении в свободном плавания без хода и на малой скорости в волновом дрейфе или по инерции.

Программа и условия ходовых и мореходных испытаний

Сравнительные испытания ходкости и мореходности моделей судов проводились в опытовом бассейне гравитационного типа Ленинградского кораблестроительного института с 3 декабря 1985 года по 12 января 1986 года. Длина бассейна 36 м, ширина 5.5 м, наибольшая глубина 3м. Объектами исследований стали три модели судов:

1. Эталонная модель судна «**Виктори**» (М: 1:45):

Длина по ватерлинии	L = 3.012 м;
Ширина	B = 0.42 м;
Осадка	T = 0.194 м;
Водоизмещение	D = 165 кг;
Площадь смоченной поверхности корпуса	S = 1.821 м$^{2;}$
Коэффициент общей полноты	δ = 0.675;
Коэффициент полноты действующей ватерлинии	α = 0.740.

2. Модель быстроходного судна **60-й серии** (М: 1:70):

Длина по ватерлинии	L = 2.1 м;
Ширина	B = 0.295 м;
Осадка	T = 0.125 м;
Водоизмещение	D = 44.3 кг;
Площадь смоченной поверхности корпуса	S = 0.776 м$^{2;}$
Коэффициент общей полноты	δ = 0.572;
Коэффициент полноты действующей ватерлинии	α = 0.744.

3. Модель корабля с уменьшенными моментами инерции площади действующей ватерлинии и со смещенным в нос центром величины подводного объема (**МИДВ**):

Длина	(Max, KWL, ⊥⊥)	L = 2.6, 2.32, 2.2 м;
Ширина	(Max, KWL, Deck)	B = 0.32, 0.2133, 0.232 м;
Осадка	(Max, ⊥⊖⊥)	T = 0.16, 0.145 м;
Высота борта	(Max, ⊥⊖⊥)	H = 0.31, 0.275 м;
Водоизмещение		D = 59.4 кг;
Площадь смоченной поверхности корпуса		S = 1.113 м$^{2;}$
Коэффициент общей полноты		δ = 0.827.

Целью испытаний второго этапа являлось исследование ходкости и качки модели МИДВ в условиях тяжелого и умеренного волнения. Для возможности сопоставления мореходных свойств новой модели методом исследования был выбран сравнительный анализ результатов аналогичных испытаний модели быстроходного судна 60-й серии (рис.15) с коэффициентом общей полноты $\delta = 0{,}572$. Среди современных мореплавателей суда с такими характеристиками и формой корпуса определяются как обладающие превосходными мореходными свойствами в условиях штормового волнения.

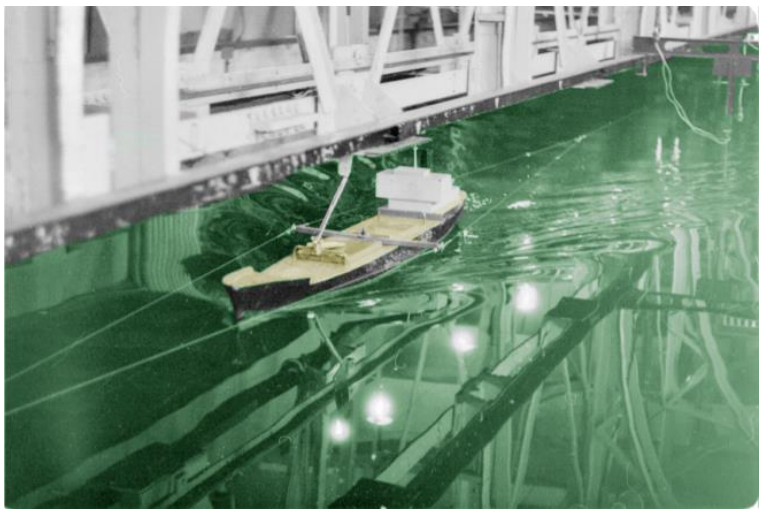


***Рис. 15. Испытание модели судна 60-й серии** с использованием гравитационной буксировочной системы*

Характеристики модели МИДВ, установленные для выполнения мореходных испытаний на волнении: L_{WL}=2,32*м*; D=55,1*кг*; B_{WL}=0,213; S=1,05$м^2$; T=0,15*м*; δ=0,802.

Буксировка моделей осуществлялась с использованием гравитационной системы, позволяющей проводить испытания в условиях наиболее приближенных к реальному плаванию на волнении, когда скорость судна зависит не только от тяги двигателей, но и от характера взаимодействия корпуса с внешним морским волнением. В частности, в экспериментах на волнении можно было наблюдать кратковременные остановки модели и даже - обратный ход.

Для исключения ходового дифферента, возникающего под действием момента сил сопротивления и тяги, было изготовлено специальное приспособление к упряжке гравитационной системы, состоящее из Г-образного рычага (рис. 16), с помощью которого точка приложения силы тяги была перенесена на уровень центра величины подводной части корпуса модели МИДВ.

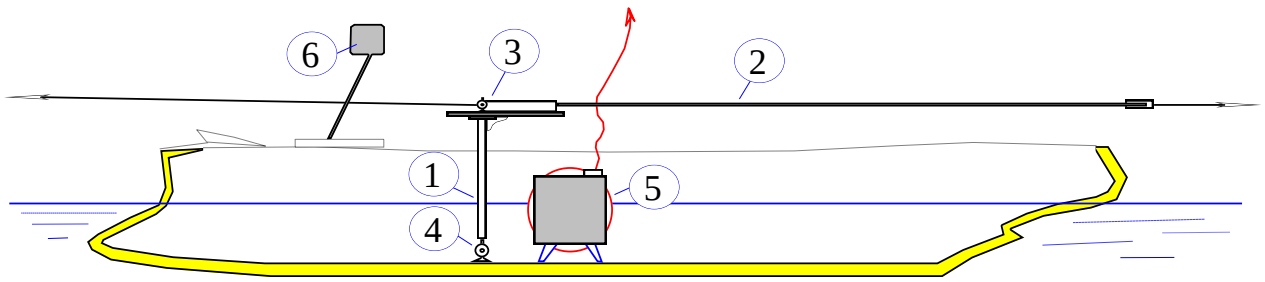


***Рис. 16. Схема упряжки модели МИДВ в гравитационной системе опытового бассейна**, с переносом точки приложения тяговой силы на уровень ниже ватерлинии. (1) - вертикальная штанга; (2) - горизонтальный рычаг; (3) - площадка для крепления упряжки в центре тросового ромба; (4) -степс на прочном киле внутри корпуса модели с поперечной осью для крепления Г-образного рычага; (5) –гировертикаль; (6) - флажок для отметки времени прохождения мерного отрезка пути*

Непосредственно перед началом испытаний ходкости на волнении для каждой модели строились буксировочные кривые сопротивления движению на спокойной воде, при этом на моделях было уже смонтировано все оборудование, используемое для испытаний на волнении. Тарировка волнографа проводилась два раза за смену, тарировка гировертикали – по одному разу для каждой модели после завершения всех испытаний на волнении.

Регулярное волнение создавалось с помощью штатного механического плунжерного волнопродуктора, которым оснащен опытовый бассейн Ленинградского кораблестроительного института. В испытаниях устанавливались следующие характеристики волнения:

Амплитуда волны: A = 0.15, 0.075 м;

Длина волны: l = 1.0, 2.137, 2.934, 4.0 м.

Максимальная амплитуда: A=0.15 м. больше осадки модели МИДВ на 15 мм и больше осадки модели быстроходного судна 60-й серии на 25 мм.

Третий этап испытаний состоял в визуальном наблюдении за поведением модели МИДВ на регулярном волнении в условиях неуправляемого движения по инерции и свободного плавания под действием волнения и волнового дрейфа. На волнопродукторе выставлялась максимальная высота волн, а их длина определялась при подго-

товке конкретного экспериментального наблюдения. В частности, делалась попытка приведения судна в аварийное состояние, связанное с опрокидыванием или жестким захватом корпуса гребнем волны.

По наблюдениям за свободным плаванием на волнении проверена корректность основных выводов из технико-исторического анализа мореходности кораблей и судов, строившихся в прошлые века, и форма корпуса которых наиболее близко соответствует новой модели МИДВ.

Удержание модели на месте и придание ей импульса свободного движения по инерции осуществлялось вручную, с технологического мостика над поверхностью воды.

При подготовке модели к испытаниям третьего этапа, весь балласт расклинивался или приклеивался к внутреннему набору корпуса, а палуба герметично задраивалась.

Для контроля положения модели внутри опытового бассейна на ее палубе, в районе 3-го и 16-го шпангоутов, были закреплены два 5-метровых конца из капроновых нитей. Этими нитями задавался курс модели относительно фронтов волн, предупреждались удары корпуса о борта и арматуру опытового бассейна.

Для проверки возможности самостоятельного выхода неуправляемой модели на курс носом на волну задавались три режима: $\lambda = 1$ м, $A = 0.13$ м; $\lambda = 2.5$ м, $A = 0.18$ м; $\lambda = 4$ м, $A = 0.2$ м. В остальных случаях использовался режим с длиной волны, равной длине модели, и амплитудой, равной ее высоте борта: $\lambda = 2.6$ м, $A = 0.2$ м.

Сопоставление ходкости модели МИДВ с моделями традиционных судов

При расчетах сопротивления трения эквивалентной пластины использовалась стандартная формула ITTC-57: $C_F = \dfrac{0.075}{(\log_{10} Rn - 2)^2}$.

Наилучшая ходкость модели МИДВ достигалась при **оптимальной посадке: T=125мм; ΔT=20 мм на корму**. Экспериментально минимум удельного остаточного сопротивления был обнаружен на осад-

ке, соответствующей максимальному завалу бортов (*на уровне точки перегиба контура мидельшпангоута*).

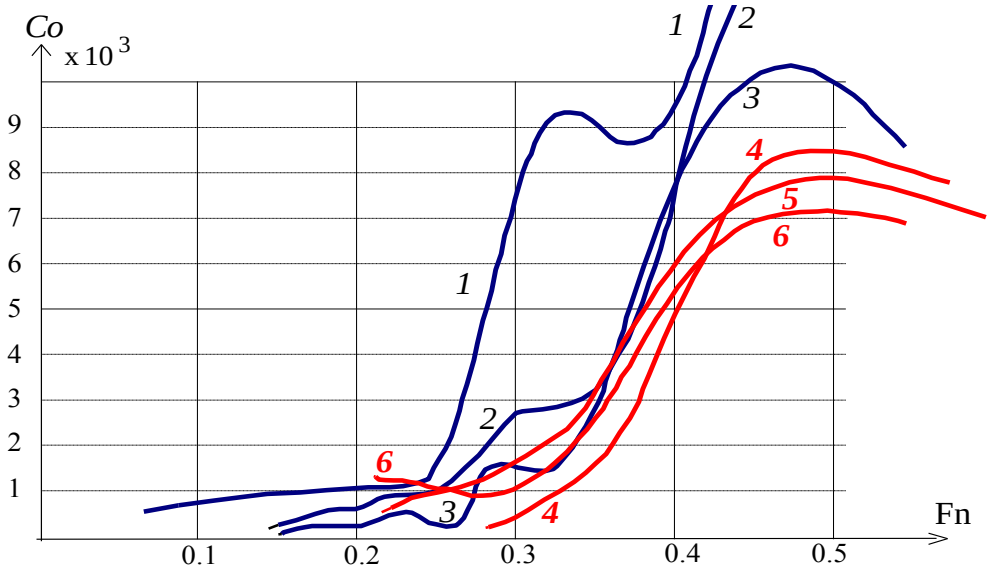


Рис. 17. Сравнительные кривые коэффициентов остаточного сопротивления моделей. *1. Эталонная модель «Виктори»; 2. Модель 60-й серии; 3. МИДВ, осадка: T=135 мм; 4. - T=125 мм; 5. - ΔT=40 мм на корму; 6. - ход кормой вперед; 1÷3 - испытание в гравитационной системе; 4÷6. - на буксировочной тележке.*

Полностью подтверждены результаты численных расчетов волнового сопротивления, прогнозировавших улучшение ходкости на больших скоростях хода при Fn≥=0,5, которое достигается за счет завала бортов и уменьшения ширины действующей ватерлинии в средней части корпуса.

На осциллограммах волнографа подтверждалось, что максимальная высота корабельной волны соответствует скорости хода Fn≈0.5, затем высота волны начинает уменьшаться, что объясняется стабилизацией динамической посадки корпуса за счет завала бортов в средней его части, в районе действующей ватерлинии (эффект «антиглиссирования», или погружения).

В вычислительных экспериментах по минимизации волнового сопротивления показывалось, что экстремумы на буксировочных кривых должны сохраняться, если они представлены в виде удельного сопротивления, отнесенного к водоизмещению модели. Поэтому сравнение мореходных качеств выполнялось в удельных сопротивле-

ниях, которые разбивались на 3 группы: $R_X/ D \leq 0.1$ [Н/кг] – средний ход; $R_X / D \leq 0.2$ – полный ход; $R_X / D \leq 0.3$ – форсированный ход.

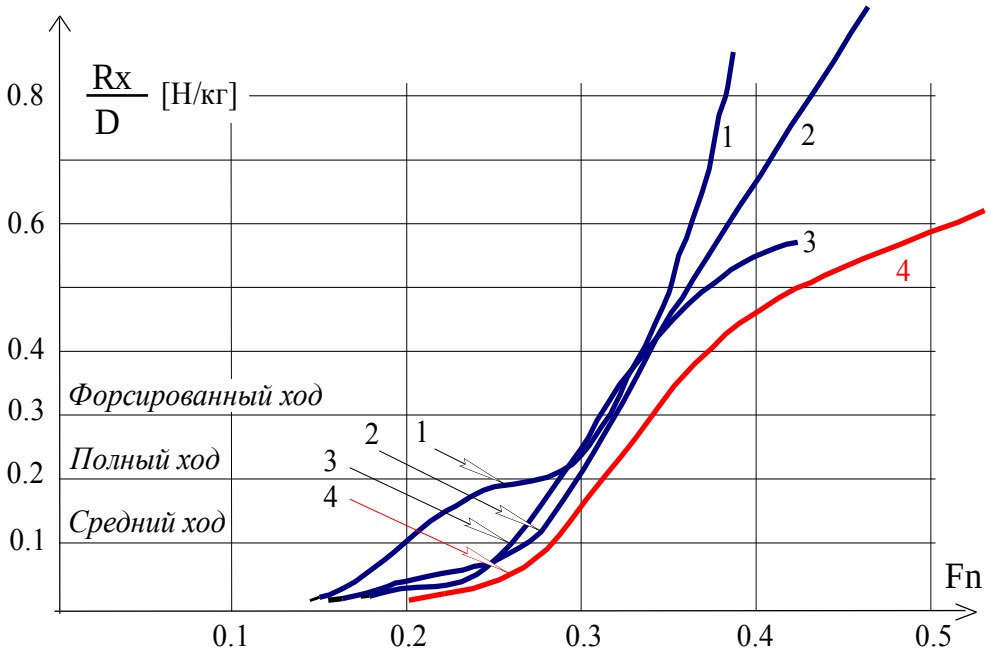


Рис. 18. Удельное остаточное сопротивление моделей. *1. «Виктори»; 2. 60-й серии; 3. МИДВ, T = 135 мм; 4. МИДВ при оптимизированной посадке: T=125мм; ΔT=20мм на корму. 1÷3 - испытание в гравитационной системе; 4 - на буксировочной тележке.*

Ходкость на волнении в зависимости от тяги движителей

Результаты испытаний ходкости на волнении удобнее всего представить в виде графиков потери хода моделей МИДВ и быстроходного судна 60-й серии (рис.19). Аргументом выбрана относительная длина волны, соразмеренная с длиной корпуса испытываемой модели $\boldsymbol{l} = \lambda / L$, где длина волны λ вычисляется по периоду времени одного такта волнопродуктора: $\boldsymbol{\lambda = g \cdot T^2 / 2\pi}$, что следует из дисперсионного соотношения для волн на глубокой воде: $\omega^2 = g \cdot k$, $\omega = 2 \cdot \pi / T$, $k = 2 \cdot \pi / \lambda$.

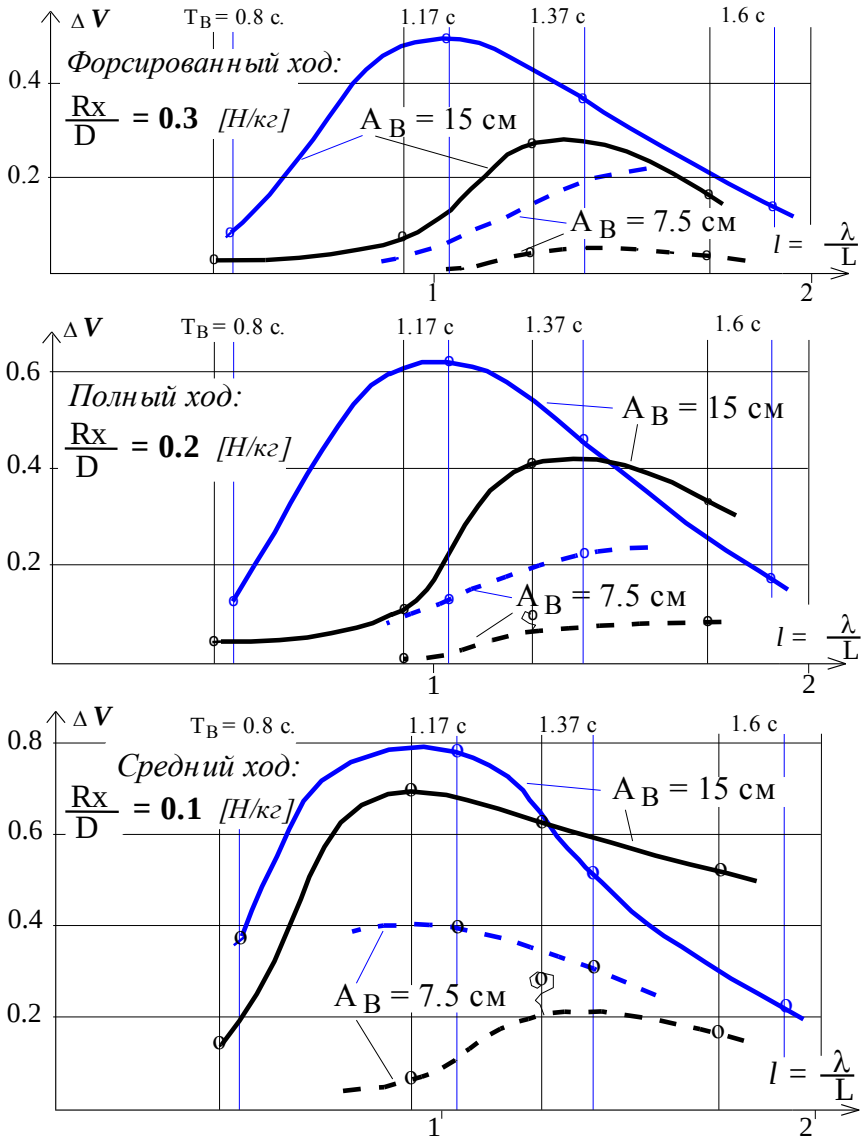


Рис. 19. Сравнение величин потери хода на волнении модели с корпусом МИДВ (черные кривые) и модели быстроходного судна 60-й серии с δ=0.572 (синие кривые).

Величины потери хода на волнении сняты с буксировочных кривых и соотнесены со скоростью моделей на тихой воде: $\Delta V = (Fn_o - Fn_в) / Fn_o$, где L – расчетная длина корпуса испытываемой модели; Fno – скорость по Фруду на спокойной воде; Fnв– скорость буксировки модели с той же тягой на волнении

На каждом рисунке приведено по две пары кривых для модели МИДВ и модели 60-й серии, одна соответствует амплитуде встречной волны равной осадке модели A_B = 15 см и половине осадки A_B = 7,5 см.

1. **Форсированный ход** – соответствует форсированному ходу военных кораблей или предельной ходкости быстроходных транспортных судов (*верхний рисунок*)
2. **Полный ход**. Главные двигатели работают в расчетном режиме, соответствующем экономичному ходу (*средний рисунок*);
3. **Средний ход**. Обычный режим плавания в условиях хода на крупном волнении или штормования (*нижний рисунок*).

Оценка ускорений в оконечностях моделей по отношению к динамике жидкости в гребне волны

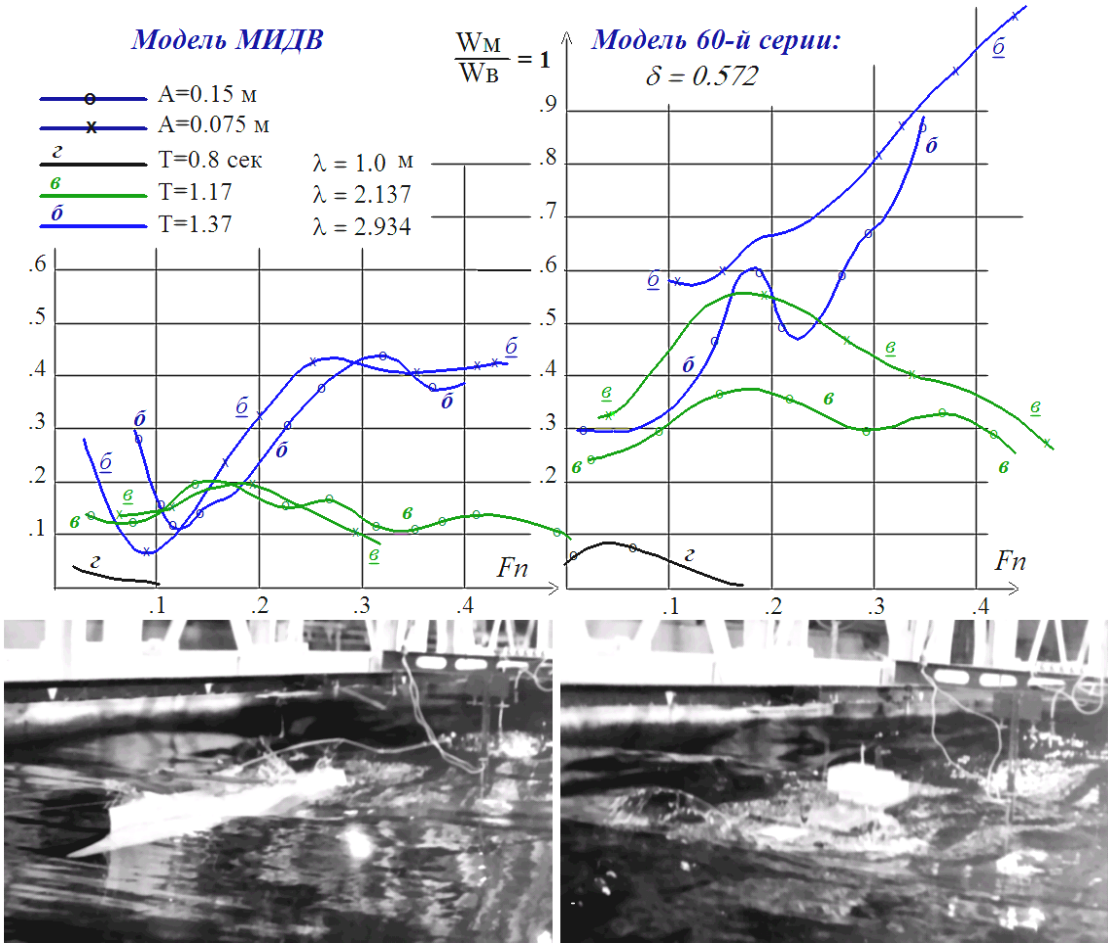


Рис. 20. Интенсивность килевой качки в зависимости от скорости *хода в различных условиях встречного регулярного волнения с нормировкой на вертикальные ускорения частиц жидкости в гребне волны. Левый рисунок – модель МИДВ, правый – 60-й серии*

На рис. 20 представлены величины ускорений в оконечностях корпуса, обезразмеренные по величине $W_B = \omega^2 \cdot A = 4\pi^2 \cdot A/T$, пред-

ставляющей максимальные ускорения для частиц жидкости на свободной поверхности в гребне прогрессивной штормовой волны. В случае обрушающегося гребня, ускорение в гребне волны достигает g – ускорения свободного падения.

В построении рисунков учтен осредненный (среднестабильный) размах килевой качки. Максимальный же размах отмечался в полтора раза большим, а в некоторых случаях всплески в записях бортового гирогоризонта в два раза выше осредненных.

По результатам буксировочных испытаний на волнении можно сделать вывод, что судно с уменьшенными моментами площади действующей ватерлинии в целом обладает лучшей ходкостью по сравнению с традиционным быстроходным судном. Особенностью нового корпуса является также то, что в самом опасном режиме плавания, когда длина штормовой волны равна длине корпуса, **возможно поддержание высокой скорости хода**.

Уменьшение динамического взаимодействия корпуса с морским волнением, отдаление резонанса на более низкие частоты собственных колебаний корпуса по всем видам качки способствовали существенной стабилизации корпуса *(1,5-2,5 раза)* в сравнении с аналогичными параметрами качки традиционного быстроходного судна *(с малым коэффициентом общей полноты корпуса)*. Возможно, что и остаточную килевую качку можно уменьшить с помощью традиционных активных (жидкостных или крыльевых) успокоителей, так как в экспериментах с моделью МИДВ практически не наблюдалось резких движений корпуса под воздействием «ударов» встречных волн. Соответственно, созданные с помощью новой формы корпуса условия для работы активных успокоителей продольной качки (*в виде горизонтальных рулей или насадок на гребных винтах*) не только повысят комфортность обитания экипажа при ходе судна на умеренном волнении, но и, будучи задействованными в качестве активной системы позиционирования, смогут улучшить плавность хода, повысить эффективность маневрирования, а также обеспечить безопасность плавания в условиях ураганных штормов.

Анализ выполнения проектных требований к модели с малой инерцией действующей ватерлинии

Модель МИДВ показала лучшие ходовые качества, по сравнению с моделями с традиционными обводами, что справедливо в интервале скоростей, характерных для режима плавания военных кораблей или быстроходных транспортных судов.

1. Ходовые испытания на тихой воде

Выводы из формального анализа буксировочных кривых говорят о том, что модель МИДВ с $\delta = 0.827$ показывает лучшие ходовые качества на спокойной воде, чем модель быстроходного судна 60-й серии с $\delta = 0.572$, при этом несколько уступая ей на числах Фруда от 0.36 - до 0.41, что обусловлено специальным проектированием носовых обводов модели МИДВ, допускающих сравнение ходкости при разной посадке модели. Если же проводить сравнение с формой корпуса эталонной модели «Виктори» с $\delta = 0.675$, имеющей примерно сходные основные характеристики формы корпуса, то преимущество нового корпуса на экономичных скоростях хода Fn = 0.27÷0.37, можно назвать существенными.

Улучшение ходовых качеств обнаружено также при дифферентовке модели МИДВ на корму. Это говорит о том, что погружение носового бульба по отношению к заглублению бортовых булей на мидель-шпангоуте неоправданно и будет ошибкой при разработке теоретического чертежа реального корабля.

Качественный анализ кривых остаточного сопротивления подтверждает результаты численной оптимизации формы корпуса по волновому сопротивлению, выполненной с использованием формул Мичелла. В расчетах для модели МИДВ прогнозировалось значительное снижение волнового сопротивления на скоростях хода меньше, чем Fn=0.32. Это подтверждалось всегда, независимо от осадки модели. Экспериментально подтверждено также некоторое увеличение сопротивления на скорости Fn≈0,4, которое проявлялось как смещение минимума сопротивления от точки на Fn≈0,35, к точке Fn≈0,32.

Хорошие ходовые качества модель МИДВ показала при буксировке кормой вперед. В этом случае, несмотря на большую смоченную поверхность (≈30%), в сравнении с моделью судна 60-серии, полное удельное сопротивление модели МИДВ было меньше на любых скоростях хода. При оценке удельного остаточного сопротивления на скорости Fn≈0.4, также были получены хорошие результаты, что объясняется отсутствием эквидистантных ватерлиний и шпангоутов в кормовой части корпуса.

Из анализа кривых сопротивления следует вывод, что модель МИДВ нуждается в дальнейшей доработке формы корпуса:

1. Необходима доработка формы корпуса для обеспечения (восстановления) минимума волнового сопротивления на скорости хода Fn = 0,4;

2. Коэффициент общей полноты модели при необходимости может быть значительно увеличен, что дополнительно снизит полное удельное сопротивление без особо сильного влияния на волнообразование;

3. Для дополнительной минимизации полного сопротивления может быть уменьшена смоченная поверхность корпуса.

Рекомендации к изменению теоретического чертежа разрабатывались с использованием геометрической картины волнообразования, интерпретированной на основе теории корабельного волнообразования Мичелла.

В эксперименте с моделью МИДВ на осадках, близких к проектной, наблюдалось слабое проявление поперечных корабельных волн за кормой, на любых скоростях движения. Из этого следует вывод, что с позиций интерференции волнообразования форма корпуса модели МИДВ близка к оптимальной. Расходящаяся же волна, особенно на скоростях движения Fn ≈ 0,35÷0,5 была чрезмерно большой, что привело к увеличению волнового сопротивления на скорости Fn ≈ 0,4.

2. Ходовые испытания на волнении

Ходовые испытания на регулярном волнении в основном показали улучшение ходовых мореходных качеств модели МИДВ в сравнении с быстроходным судном 60-й серии. Это проявлялось также и в значительном уменьшении амплитуды килевой качки, увеличении ее периода и в значительно меньших потерях хода

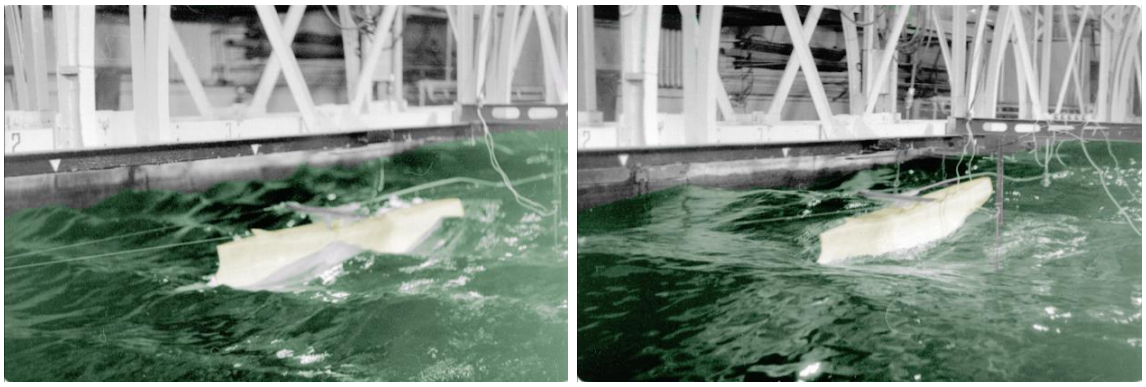


Рис. 21. Испытание ходкости модели на регулярном волнении с использованием гравитационной тяги *воспроизводит реальное поведение корабля, в том числе в наиболее жестких условиях волнения.*

Успешно удовлетворено требование к модели МИДВ, касающееся взаимодействия корпуса с волнением, и в эксперименте можно было наблюдать, что встречные волны модель МИДВ оставляет за кормой почти недеформированными. Замечено, что продольная качка этой модели происходит вокруг оси, лежащей вблизи форштевня, вследствие чего носовая часть корпуса была всегда хорошо стабилизирована, а также всегда обеспечивалось условие незаливаемости верхней палубы, в отличие от модели судна 60-й серии, высокий форштевень которой способствовал усилению килевой качки и, как следствие, интенсивной заливаемости верхней палубы высокоскоростными гребнями встречных волн.

При буксировке модели МИДВ кормой вперед наблюдалось значительное усиление килевой качки, хотя амплитуда ее не превосходила размах качки модели судна 60-й серии. Последнее объясняется ухудшением мореходности в случае больших надводных объемов в носовой части корпуса. Но из-за уменьшенной площади действующей ватерлинии качка не становилась большей, чем у модели из серии 60.

Модель судна 60-й серии при испытаниях на длине волны, равной длине корпуса, и амплитуде, равной половине осадки, при буксировке с минимальной силой тяги неожиданно потеряла ход, при этом резко возросла килевая качка, а возникший параметрический резонанс привел к сильному рысканию и разрушению палубных креплений модели в упряжке гравитационной системы. Дальнейшие испытания модели 60-й серии в этом режиме волнения были прекращены, несмотря на то, что проведенные ранее на той же длине волны, но с большей амплитудой не приводили к аналогичным аварийным ситуациям. При испытаниях модели МИДВ неблагоприятных режимов качки обнаружено, несмотря на то, что после аварии модели 60-й серии был продолжен специальный поиск опасных режимов плавания.

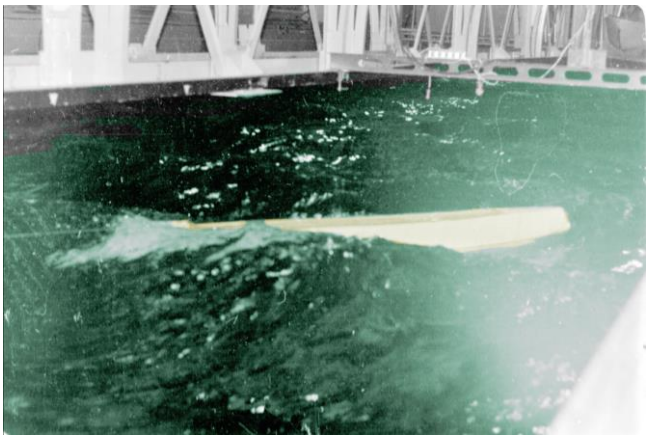


Рис. 22. К корпусу модели, находящейся в свободном плавании без хода, приближается большая волна *с предельной амплитудой и разрушающимся в ее вершине гребнем. В следующий момент времени вблизи корпуса модели с заваленным бортом амплитуда волны уменьшится, волна начнет перетекать под днищем на другой борт без особой деформации, а модель сохранит свою пассивность и не проявит каких-либо резких движений под воздействием этой гидродинамически правильной прогрессивной волны*

При движении по волне с минимальной тяговой силой модель МИДВ легко “подхватывалась” и шла со скоростью волны. Однако при этом не наблюдалось тенденций к рысканию или уходу с курса с резким поворотом, которые в случае традиционных судов грозят сильным накренением или опрокидыванием.

3. Наблюдения за свободным плаванием модели МИДВ на волнении

После окончания первого этапа проводились испытания модели МИДВ в свободном плавании на волнении. Ставилась цель: выявить,

выходит ли модель самостоятельно на курс носом на волну. Для этого была выбрана проектная посадка, и варьировались характеристики остойчивости и параметры волнения. Амплитуда волн всегда назначалась предельно максимальной, которую допускал плунжерный волнопродуктор опытового бассейна.

Самопроизвольного выхода модели МИДВ на курс носом на волну обнаружено не было. Корпус не стремится встать лагом к волне и всегда уходит из этого положения, вставая под углом ≈45° к фронту, обычно кормой на волну.

Второй этап аналогичных экспериментов по обнаружению опасных режимов аварийного плавания был проведен после окончания заключительно этапа ходовых испытаний на волнении. Сначала было проведено несколько прогонов модели на попутном волнении при длине волны, равной длине корпуса и имеющей максимально допустимую амплитуду ($A_{волны}$=20*см*, при этом волны, ударяясь о стенку, выплескивались из бассейна). Ожидалось, что в случае «захвата» корпуса попутной волной, модель может быть серьезно повреждена или разрушена. Однако, модель легко подхватывалась и шла со скоростью волны, остойчивости не теряла, и не проявляла стремления к рысканию или уходу с курса.

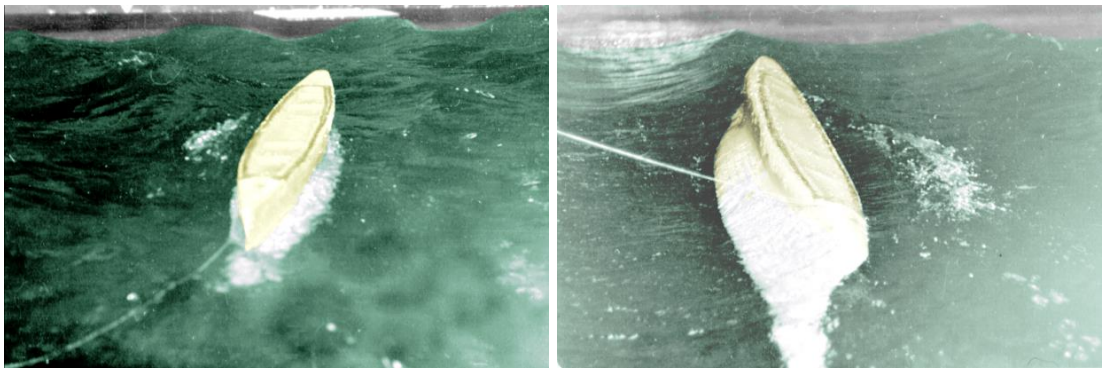


Рис. 23. В случае удара волны о борт судна *(резонансное раскачивание корпуса с высокой начальной остойчивостью), находящегося в положении лагом к волне, усиления качки не происходит, что обусловлено ярко выраженной S-образностью диаграммы остойчивости и связанной с этим нелинейностью бортовой качки.*

Затем проводились наблюдения за свободным плаванием модели на этом же волнении при варьировании дифферента и начальной остойчивости. При уменьшении остойчивости, после загрузки балласта на палубу, бортовая качка практически исчезла, модель перестала крениться на сильном волнении. Это обусловлено тем, что собственный период бортовой качки модели достигал T_M = 6 секундам, а период волнения был существенно меньше - T_W = 1.21 секунды. Снова наблюдалось пассивное отношение модели к курсу относительно фронта волн.

На фотографиях (рис. 23) видно, что волны проходят через корпус, не претерпевая сильных искажений своей формы. Удалось также зафиксировать момент “удара” корпуса о волну, при котором резонансного усиления амплитуды бортовой качки не произошло. После уменьшения чрезмерной начальной остойчивости столь интенсивного взаимодействия модели МИДВ с волнением больше не наблюдалось.

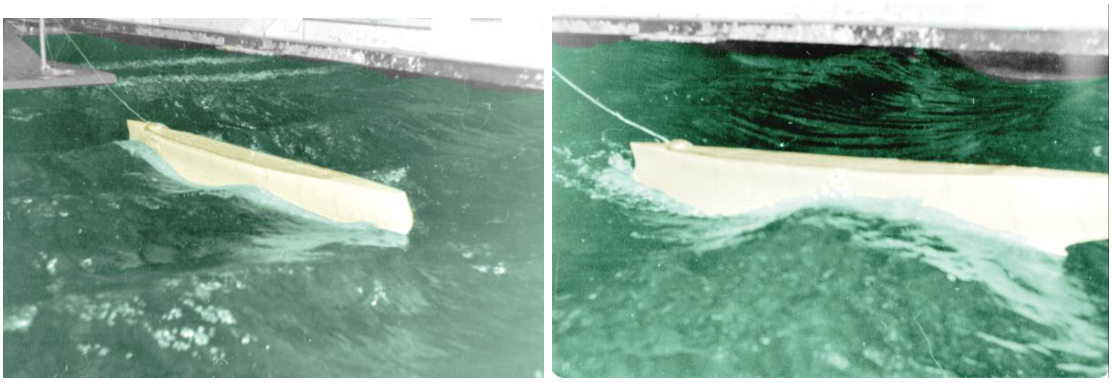


***Рис. 24. Свободное движение модели навстречу волнению**. Заметного рыскания, интенсивной килевой качки или неудержимого ухода с курса не проявлялось.*

На фотографиях (рис. 24) показано положение модели в движении по инерции навстречу волне. В этом режиме плавания она долго сохраняла курс и скорость, даже при длине волны, равной длине корпуса. Модель начинала уходить с курса только после полной остановки, в процессе дрейфа по волне. Можно сделать вывод, что такое судно, в штормовом море при активно работающих движителях, сможет свободно держать ход любым курсом относительно волн.

В свободном дрейфе модель выходит на курс≈45° к фронту кормой на волну. При придании импульса движения по волне модель не останавливалась и не стремилась к быстрому уходу с курса, даже если захвата волной не происходило. Создается впечатление, что, несмотря на малую скорость хода в режиме эпизодического захвата корпуса попутной волной, сил на рулях будет достаточно для удержания судна на курсе по волне даже при остановленных двигателях.

При попытке развернуть корпус из положения лагом к волне на курс носом на волну с помощью нити, закрепленной на палубе в районе 3-го шпангоута, было обнаружено, что центр действия сил дрейфа находится ближе к форштевню. Это подтвердилось, когда при подтягивании модель стала приближаться кормой вперед. По срыву волновых потоков с верхней кромки выдающегося вперед бульба было сделано предположение, что в смещении центра бокового сопротивления в нос принимает участие бульб также и тем, что тормозит вершину волны, в которой наблюдается максимальная скорость волнового потока. Это означает, что заостренный в верхней части и выступающий вперед бульб, не позволяет модели самостоятельно выйти на курс носом на волну.

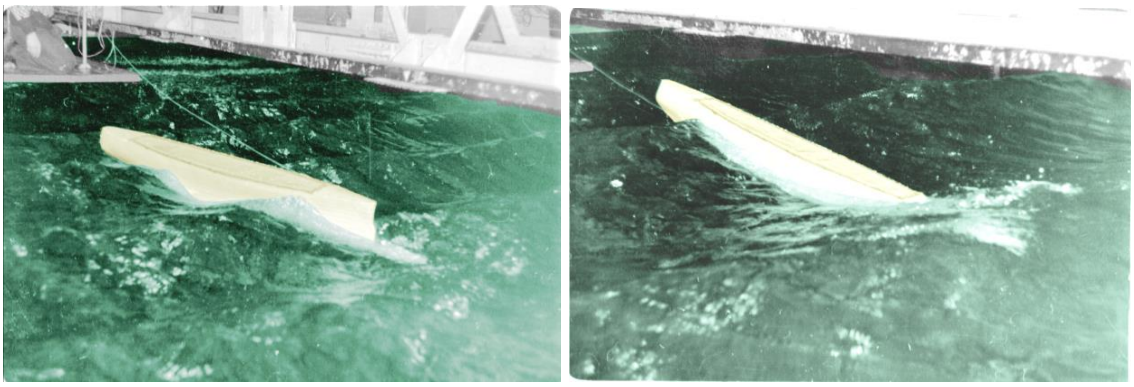


Рис. 25. Свободное плавание по волне и захват корпуса попутной волной.

Наблюдения за свободным плаванием оптимизированной модели на взволнованной поверхности опытового бассейна позволили сделать только предварительные технические замечания об особенностях оптимизированного по условиям безопасности штормового плавания корабля без хода, которые, тем не менее, не выявили противоречий

между стремлением к наилучшей штормовой ходкости и стабилизации корпуса, и безопасности штормового плавания аварийного судна.

В проведенных экспериментах с гипотетической моделью было выявлено, что сильно зауженная корма хорошо проявляет себя при испытаниях безопасности плавания на крупном волнении без хода, что было обусловлено пассивностью корпуса относительно курса на волнении и не выявляло противоречий с проектной концепцией корпуса, как “флюгера на волнении”.

Модель МИДВ, имеющая далеко выдвинутый вперед бульб и нависающую над водой корму, не проявила свойств флюгера и не проявляла активного стремления к выходу на курс носом на волну. В реальных штормовых условиях на корпус корабля будут оказывать влияние давление ветра и вызываемое ветром и нелинейными процессами в гребнях волн сильное дрейфовое движение корабля. При возникновении движения должно проявиться смещение в нос центра бокового сопротивления, которое при парусящей на ветру и под ударами гребней волн кормовой части корпуса создаст необходимый момент для выведения корабля на курс носом на волну.

Выявленные недостатки в проекте формы корпуса модели МИДВ

При проектировании модели корпуса для ходовых и мореходных испытаний, надводные объемы в кормовой части корпуса были слишком сильно уменьшены, что требовалось как для ее испытаний в широком диапазоне осадок, так и для обеспечения испытаний мореходных свойств модели на заднем ходу (режим плавания с хорошей всхожестью на встречную волну).

Такой метод интерференционного снижения волнового сопротивления на тихой воде предлагался Я.И. Войткунским в книге «Сопротивление воды движению судов» [1964]. В некоторых случаях модель действительно показывала хорошую ходкость на курсе кормой вперед, однако при плавании на волнении корпус испытывал усиленную килевую качку, грозящую сорваться в параметрический резонанс, что делало невозможным столь же полное проведение мореходных

экспериментов *(в случае параметрического резонанса, при сильном рыскании и бортовой качке вырываются крепления корпуса в упряжке гравитационной системы*).

К сожалению, эта особенность формы кормовой раковины сказалась и на ходкости модели в условиях длинных (*длиннее корпуса*) волн, так как уменьшенные объемы и продольная симметрия надводной части корпуса не обеспечивали должного удержания кормового подзора вблизи поверхности воды, а из-за отсутствия нелинейного демпфирования иногда возникала усиленная вертикальная качка.



Рис. 26. Проверка влияния уменьшения полноты скуловых обводов *на форму корабельного волнообразования. На верхнем рисунке скорость соответствует Fn≈0,3, на нижнем Fn≈0,7. По-видимому, в этом эксперименте принципиально изменился характер образования расходящихся корабельных волн.*

Соответственно килевая качка, ***у которой центр вращения сохранял стабильное положение в носовой части корпуса,*** приводила к необоснованно большим вертикальным размахам уровня воды в районе кормового подзора. Однако последнее не является неустранимым недостатком проекта, так как восстановление «нависающего над водой» кормового подзора с увеличенным надводным объемом в любом случае требуется с целью стабилизации потока и предотвращения оголения винто-рулевого комплекса.

Стабилизация корпуса на волнении

Вышеуказанные свойства формы корпуса, оптимизированного по волновому сопротивлению на спокойной воде, в основном положительно сказались на стабилизации корабля, как движущейся платформы в штормовом море. Уменьшение площади и моментов инерции действующей ватерлинии, с сохранением массовых моментов инер-

ции, привело к существенному увеличению периодов собственных колебаний корпуса.

В исходных гипотезах заложено, что для недопущения интенсивного отражения морской волны от бортовой обшивки корпуса, в процессе которого возможна передача волновой энергии на опасное усиление рыскания и качки корабля, необходимо оптимизировать волновое сопротивление на всех скоростях хода, включая высокоскоростные режимы с числами Фруда $Fn \geq 0.5$, на которых происходит образование корабельных волн с такими же параметрами, как и внешнее морское волнение.

Эта задача решалась численным моделированием волнового сопротивления с использованием формул Мичелла. При этом детальная физическая интерпретация подынтегральных выражений Мичелла позволяет не только провести уточненные расчеты волнового сопротивления, но также, по результатам геометрической интерпретации формы локального волнообразования, уточнить форму шпангоутов для локальных участков судовых обводов, в первую очередь в районе носовой скулы и в корме, в зоне отрыва потока. Аналогичные исследования ранее выполнялись Г.Е. Павленко в книге «Сопротивление воды движению судов» [1953], в которой также проводилась физико-геометрическая интерпретация корабельного волнообразования с целью отработки элементов судовой поверхности, которые способствовали бы уменьшению интенсивности трансформации волн при их взаимодействии с корпусом.

Корабль не может образовывать очень короткие корабельные волны. *Они либо разрушаются вблизи расходящихся ветвей носовых ватерлиний, когда угол наклона поверхности воды превышает критический для стоячей волны (60°), либо увеличивают свою длину по мере накопления избыточной энергии на фронте волны с превышением критического наклона для свободной прогрессивной волны Герстнера (30°)*. Поэтому нет оснований для введения в обводы корпуса сильно искривленных ватерлиний. Но все же важнейшим и исторически оправданным методом ослабления энергии взаимодействия с корот-

кими волнами, *что необходимо для предотвращения резких ускорений при бортовой качке*, является завал бортов в средней части корпуса, и в том числе на уровне действующей ватерлинии. Снижение интенсивности ударов волн о корпус корабля должно достигаться также за счет исключения нависающего над водой форштевня, чрезмерно больших нависающих над водой надводных объемов в кормовой части корпуса, а также максимально возможным заужением ватерлиний в оконечностях. Это не означает обязательного уменьшения объемных коэффициентов полноты формы корпуса, которые могут быть существенно большими за счет дополнительных подводных объемов в носовой части корпуса (грузовые отсеки), и надводных – в кормовой (помещения для экипажа, аппарели для горизонтальной погрузки и других отсеков для легких и объемных грузов).

Историческое заключение для новых перспективных проектов кораблей и судов

Методы пассивной стабилизации корпуса путем построения красивых обводов и скромного внешнего облика корабля имеют хорошо известные исторические прототипы, это корабли и суда конца XIX и начала XX веков, обладавшие строгим однообразием проектных решений по форме корпуса и схемам общего расположения палубных надстроек. Именно в те годы к кораблям предъявлялись наиболее высокие требования по обеспечению безусловно высокой штормовой мореходности, что одновременно положительно сказывалось на всех других эксплуатационных и боевых качествах океанских кораблей в целом. Повышение критериев функциональности имеет особую значимость для научно-исследовательского, спасательного и военного флотов, которые обязаны иметь высокий уровень мореходности, в том числе в сложных условиях штормового плавания.

Для современного корабля, оснащенного сложными комплексами гидроакустической и радиоэлектронной аппаратуры, стабилизация корпуса на волнении становится ключевым требованием, обусловливающим маневренность корабля и эффективность использования его

вооружения. В частности, общее снижение интенсивности килевой качки крайне необходимо для обеспечения стабильности потока в районе гидроакустических антенн, установленных в носовом бульбе или в подкильных гондолах. И только пассивное снижение всех видов качки на волнении за счет специальной формы корпуса корабля может позволить эффективно применять активные средства стабилизации, что крайне необходимо, например, спасательному флоту, обязанному уверенно маневрировать в непосредственной близости у борта аварийного судна.

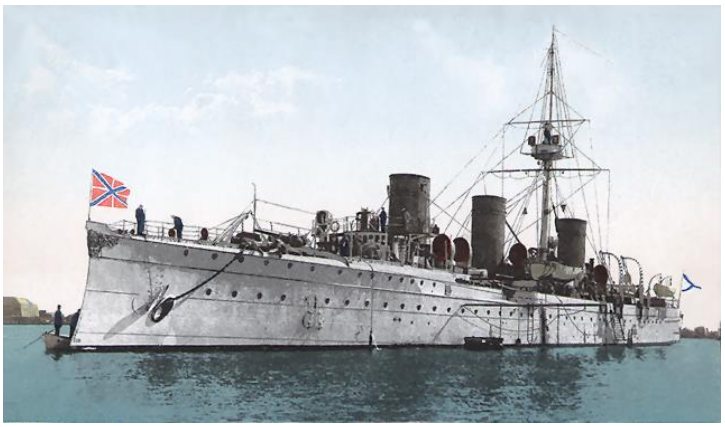


Рис. 27. Крейсер II ранга «Новик»
эскадры Тихого океана 1904 г

Для решения поставленной задачи могут быть использованы как чисто проектные или эвристические подходы, так и математические методы построения формы корпуса, позволяющие минимизировать интенсивность силового взаимодействия между кораблем, волнением и ветром. Только после глубокой пассивной компенсации широкого спектра штормового волнения, дестабилизирующего движение корабля, возможно эффективное использование активных успокоителей качки.

Можно обратить также внимание на то, что гидроакустические или радиолокационные волны, используемые в системах поиска целей и наведения морского оружия, по физической сути и математическому определению подобны штормовым волнам, по которым должна проводится оптимизация формы корпуса. Тогда один из тезисов метода непротиворечивого проектирования корабля может быть сформулирован как: «*Округлая в целом форма корпуса способствует штормовой стабилизации корабля и уменьшает интенсивность гидроакустических и радиолокационных откликов для систем его обнаружения*».

Безопасность штормового плавания и общие вопросы хорошей мореходности

Основные предположения об улучшенных мореходных качествах гипотетической модели корабля с уменьшенной площадью и инерцией действующей ватерлинии, испытанной в опытовом бассейне, сделаны с использованием технико-исторического анализа мореходности кораблей и судов, строившихся до конца XIX - начала XX веков. В те далекие исторические времена проектирование новых кораблей обычно выполнялось при активном участии самих мореплавателей. До этого же срока существовала техническая эволюция и последовательное совершенствование представлений о наиболее мореходной форме корпуса, история которых берет свое начало от древнего Финикийского флота.

При построении обводов перспективных кораблей и судов, представляемых в данной главе, учитывались также многочисленные наблюдения за штормовыми мореходными качествами судов флота рыбной промышленности СССР в атлантических и тихоокеанских рыбопромысловых экспедициях.

За исторический прототип при выборе формы корпуса удобнее всего использовать известный исторический крейсер “Аврора”. Для более отчетливой демонстрации ***хорошей мореходности “Авроры”***, ее мореходные свойства, обуславливаемые формой корпуса, в испытанной гипотетической модели несколько усилены в соответствии с проектной последовательностью: {современный корабль} → {Крейсер “Аврора”} → {новый гипотетический корпус с гиперболизованными свойствами формы корпуса}.

Результаты технико-исторического анализа мореходности сводятся к системе требований:

1. Смещение центра величины в нос за счет развитых бульбовых образований в носовой оконечности.

Цель: *Обеспечение безопасного штормования без хода и стабилизация корпуса корабля, движущегося в условиях штормового волнения;*

2. Существенное снижение величины продольного момента инерции площади действующей ватерлинии и заострение ее в оконечностях.

Цель: *Снижение динамического влияния морского волнения на килевую качку;*

3. Исключение развала бортов, широкой палубы и наклона форштевня вперед в носовой оконечности корпуса.

Цель: *Предотвращение слемминга и ударов волн по скуле. Достижение устойчивости на штормовом курсе. Уменьшение килевой качки;*

4. Уменьшение ширины и непрерывности площади верхней палубы.

Цель: *Обеспечение остойчивости в условиях штормового волнения, при усиленной заливаемости верхней палубы;*

5. Существенное уменьшение надводных объемов в оконечностях, с соответствующим перераспределением их в среднюю часть корпуса.

Цель: *Стабилизация качки корабля движущегося на волнении. Уменьшение рыскания на курсе. Предотвращение захвата корпуса попутной волной;*

6. Существенное уменьшение и снижение парусности корпуса и надстроек, с перенесением соответствующих помещений внутрь корпуса под верхнюю водонепроницаемую палубу.

Цель: *Снятие ограничений на выбор курса штормового плавания и уменьшение динамического воздействия ветра, волнения и обледенения.*

Таким образом, в разрабатываемых обводах кораблей и судов планируется учесть требования технико-исторического анализа мореходности и в полной мере использовать основные неформализованные представления о хорошей морской практике, отвечающие за поддержание штормовой мореходности корабля в различных условиях активного плавания или пассивного штормования под властью штормовой стихии.

Согласование элементов формы корпуса и общекорабельной архитектуры для достижения эффективности и безопасности штормового плавания

Многообразие проектных решений по общекорабельной архитектуре и форме корпуса современных морских судов свидетельствует об отсутствии унифицированных инженерных подходов в решении задач аэрогидромеханики штормового плавания и должной оптимизации в проектировании внешнего облика корабля. Современное мореплавание располагает вполне достоверными прогнозами погоды и материалами дистанционного зондирования атмосферы и океана, а избыточная мощность главных машин позволяет судоводителю активно противостоять ураганным штормам или уклоняться от опасных встреч с тайфунами. При этом хорошая морская практика констатирует неприемлемо большие периоды простоев эстетически совершенных судов в ожидании у моря хорошей погоды.

Признаком реальной оптимизации в морской технике может быть только однообразие в проектных решениях, при которых любое различие в обводах корпуса и в общем расположении корабля должно объясняться эксплуатационными требованиями или особыми условиями района плавания. В хорошей морской практике такое определение соответствует понятию красивого корабля, означающего, что в его мореходных качествах и общей архитектуре нет ничего лишнего.

Предназначение корабля обеспечивается его мореходными качествами в сложных и штормовых условиях плавания

Эксплуатационная эффективность определяется способностью судна выполнять поставленные задачи в характерных для географического региона условиях плавания. Если штормовое воздействие ветра и волнения велико, то судно рискует потерять ход и лишиться возможности использования палубных устройств и механизмов, что вынудит судоводителя перейти к одному из режимов штормования, как к условно аварийному методу ожидания у моря хорошей погоды. Несколько проще формулируются проектные условия для плавания по

тихой воде, однако и в этом случае нельзя пренебрегать штормовой мореходностью, хотя бы для предоставления возможности своевременного уклонения от заведомо непредсказуемых опасных явлений на море.

Штормовые условия дальневосточных морей характеризуются ветрами более 30 м/с, крупными прогрессивными волнами высотой более 10 м и крутизной фронта до 30°, с периодом 6-8 с в Охотском и Японском морях, и до 15 с – в Тихом океане, а также регулярным проявлением стоячих девятых валов с крутизной гребня выше 45°. Безопасность мореходства вблизи Сахалина и Курильских островов не обеспечена наличием обустроенных портов-убежищ, отчего на рыбных промыслах и в каботажных коммуникациях должен использоваться только флот повышенной штормовой мореходности.



Рис. 28. Испытание телеуправляемой модели корабля в условиях прибойного волнения*. При выходе на мелководье протяженность фронтов штормовых волн вытягиваются, при этом крутизна гребней значительно возрастает. Любой режим маневрирования в таких условиях, особенно если обводы корпуса специально не оптимизировались для штормового плавания, становится чрезвычайно опасным*

Гидродинамические условия штормового плавания становятся намного опаснее, если глубина моря меньше длины штормовой волны. В этом случае, при сохранении групповой структуры пакетов волн, протяженность волновых фронтов заметно вытягивается, что затрудняет уклонение от встречи с опасными гребнями (рис. 28). «Де-

вятые валы» уже не ведут себя подобно стоячим волнам и быстро перемещаются на большие расстояния с поддержанием интенсивно разрушающихся гребней, и способны наносить удары по корпусу корабля с максимальной скоростью водных потоков в гребнях волн.

В Охотском море, с характерным периодом штормовых волн порядка 8 сек., на мелководьях можно ожидать прямые удары 12-метровых девятых валов с максимальной скоростью потоков воды в гребнях более 20 узлов, что может грозить любому судну катастрофическими последствиями. Именно такие условия штормового волнения складываются при плавании вблизи побережья, на якорных стоянках и мелководных банках, где рыболовный и каботажный флот вынуждены работать в течение всего навигационного сезона.

Важнейшим условием поддержания штормовой мореходности корабля является правильный учет гидродинамических свойств трохоидального волнения с обрушающимися гребнями, в том числе формализованных для использования в составе штурманских экспертных систем автоматического управления, способствующих эффективности и безопасности плавания (*в отличие от привычных настороженностей и наставлений к пережиданию у моря спокойной погоды*).

В основе новых проектно-технических решений использован судоводительский опыт активного штормового маневрирования, согласованный со знанием хорошей морской практики палубных работ в сложных, штормовых и ледовых условиях. На этом пути можно выявить главные режимы штормового плавания корабля; означить рекомендации штурману по выбору курса и скорости для эффективного решения поставленных задач в любых: сложных, штормовых и ледовых условиях плавания; и, как следствие, определить ключевые элементы формы корпуса и общекорабельной архитектуры для проектирования нового перспективного флота, наилучшим образом отвечающем его предназначению.

1. Режим штормового хода навстречу и по волне

Для многих современных кораблей штормование носом на волну является единственно возможным режимом безопасного плавания в

условиях ураганного ветра и волнения. Удержание штормового курса требует особой активности рулевого (авторулевого) и повышенной нагрузки на главных двигателях и рулевых машинах (рис. 29), постоянно подвергающихся чрезмерным перегрузкам в условиях интенсивной качки и оголения гребных винтов в кормовой оконечности корпуса. Килевая качка и продольные изгибные нагрузки на корпус корабля достигают на этом курсе своих экстремальных значений.

В случае аварии главной машины или рулевого устройства пассивный выход на курс носом на волну возможен при постановке штормовых парусов или плавучих якорей, как единственного средства спасения или штормовой устойчивости старинных парусников и кораблей с относительно малой мощностью двигателей. При увеличении скорости хода возрастает размах килевой качки, появляется опасность сокрушительных ударов встречных волн по широким носовым скулам, палубам и надстройкам, а также днищевого слеминга и глубокой зарываемости под встречную волну.

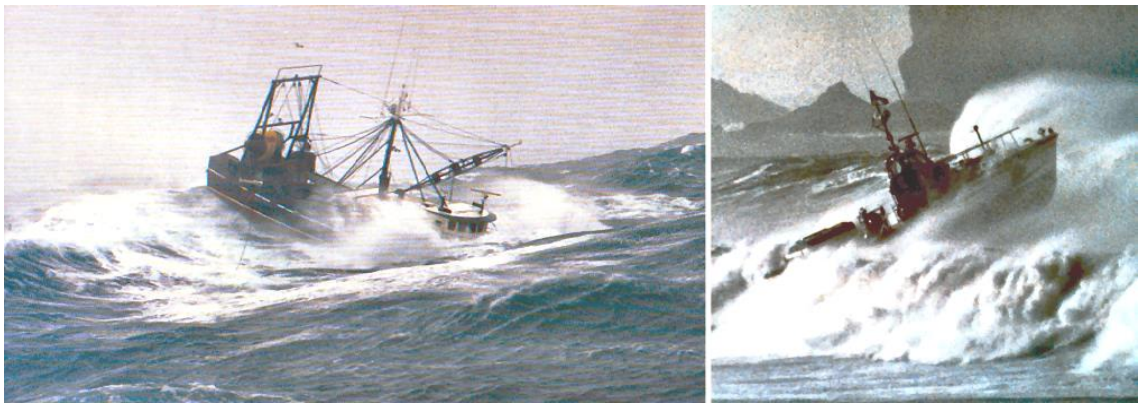


Рис. 29. *Рыболовные сейнеры (слева) и вспомогательные суда малого водоизмещения (справа), при любом раскладе нуждаются в повышенной мощности главных двигателей для удержания штормового хода и управляемости на курсе по волне или носом на волну*

Если же носовые обводы корабля оптимизированы для штормового плавания, имеют малый надводной объем, завал борта и форштевня в носовой части, подобно историческим кораблям конца XIX века, то без чрезмерных гидродинамических перегрузок возможно увеличение хода и достижение режима плавания, при котором килевая качки минимизируется, а видимый период встречных волн станет

меньше собственных периодов продольной качки корпуса. Плавности килевой качки способствует заострение носовых ватерлиний и уменьшение высоты и полноты бака, что благоприятно сказывается на исключение силовых нагрузок и поддержание ходкости при высокоскоростных контактах с гребнями встречных штормовых волн.



Рис. 30. Остановка судна на встречной волне, *и полное реверсирование потока от гребных винтов и набегающего потока на рулях*

На курсе по волне килевая качка становится плавной за счет увеличения видимого периода попутных волн, а судно приобретает возможность дельфинирования – свободного хода со скоростью распространения штормовых волн. Это крайне опасный режим плавания.

На ходу по волне корабль обязательно должен держать предельно полный ход вперед. Поток от гребных винтов, набрасываемый на перо руля, должен быть достаточно интенсивным, чтобы гребень волны, догоняющий корабль, не смог ослабить или реверсировать управляющее действие пера руля. Если есть сомнение в работе рулевого устройства, то вахтенному штурману лучше выйти на корму корабля и убедиться, что взбуруненный поток из под гребных винтов не подавляется при подбрасывании кормового подзора на гребне догоняющей волны. Если же это условие не выполняется, что вполне естественно для маломощных рыболовных судов, то при ударе девятого вала под

кормовую раковину, вместо удержания судна на курсе, рулевой может заложить крутую циркуляцию, что грозит быстрым опрокидыванием (*эффект брочинга*).

Штормовая устойчивость корпуса достигается устройством крейсерской кормы (рис. 30) с малым объемом и заостренными надводными. Такой корпус не допустит подбрасывания кормы догоняющей волной и удержит винторулевой комплекс на достаточном заглублении, где падение скорости под гребнями штормовых волн уменьшит опасность реверсивной работы пера руля.

2. Активный ход вразрез штормовой волне

Штормование малыми ходами носом на волну сопровождается резкой и изматывающей килевой качкой. Если мореходные качества судна позволяют (отсутствуют бульб и развесистые скулы в носовой оконечности), то в штормовую погоду можно выбирать ход вразрез волне – *бейдевинд*. Корабль приобретает ходкость и начинает отслеживать удлиненную поверхность волн при вполне умеренном возрастании бортовой качки.

Работающие машины обеспечивают удержание кормового подзора относительно среднего уровня моря, что обеспечивает общую эффективность работы гребных винтов и поддержание управляемости. Невозможно добиться жесткого и управляемого позиционирования относительно поверхности волны для кормовой и носовой частей корпуса одновременно. По крайней мере, носовая часть корабля (рис. 31) должна быть раскрепощена и допускать свободное рыскание и безударное вертикальное перемещение в темпе килевой качки.

Движение косым курсом по волне – *бакштаг* – необходимо для уклонения от встречи с тайфунами или для ускоренного выхода из центра штормового циклона. Для этого имеются все условия: килевая и бортовая качки становятся плавными; скорость хода корабля значительно возрастает за счет энергии попутных волн.



Рис. 31. *Недопустимо, чтобы на курсе вразрез волны носовая часть корабля подвергалась чрезмерным силовым нагрузкам со стороны штормового волнения (справа). Это означает, что вместо подводного бульба и сильного развала носовых шпангоутов, корпус должен иметь подводный подрез форштевня и предельно минимальный объем надводного борта выше ватерлинии (слева)*

Однако, если надводная форма корпуса, подводные обводы и винторулевой комплекс корабля не оптимизированы специально для поддержания столь экстремального штормового хода, то косой курс по волне становится чрезвычайно опасным. Корабль может отчасти потерять ход, откатываясь назад по наветренному склону крупной штормовой волны, и затем оказаться в жестком захвате под гребнем «девятого вала», где широкий кормовой подзор и реверсивное действие пера руля приведут к быстрому неуправляемому развороту под волну, на курс лагом к волне, сильному крену и опасности мгновенного опрокидывания под действием чисто гидродинамических сил.

3. Аварийное плавание или особые режимы хода лагом к волне

На глубокой воде в открытом море, на ходу корабля или в режиме аварийного штормования без хода лагом к волне, на верхнюю палубу попадает наименьшее количество воды. Этому способствует максимально высокая поперечная остойчивость; симметрия корпуса относительно мидель-шпангоута; наличие высоких штевней и развал борта по всей длине корабля, с наибольшим наклоном над поверхностью воды в районах кормовой и носовой скул в оконечностях корпуса. Безопасность корабля обеспечивается особыми гидродинамическими условиями в гребнях наиболее крупных волн и «девятых ва-

лов», которые на глубокой воде проявляют себя подобно стоячим волнам, не стремящимся к бортовому удару по корпусу корабля.

Гидродинамика такого плавания связана с удержанием поверхности верхней палубы параллельно наклонам штормовых волн и вполне применима для малых беспалубных судов. Такой режим штормования абсолютно не приемлем для кораблей большого водоизмещения, так как резкая качка с большим размахом в темпе штормовых волн приводит к невыносимым условиям обитаемости и не может быть обеспечена достаточной прочностью корпуса корабля.

Если корабль способен держать полный ход, то особых требований к кормовым обводам может не предъявляться до тех пор, пока развал борта в носу и в средней части корпуса способен отражать всю энергию падающих на корабль штормовых волн, и при этом не поддаваться рысканию и резкой килевой качке под неизбежными для такого режима плавания ударами штормовых волн.

И все же для режима хода лагом к волне не возникает проектных и эксплуатационных противоречий по минимизации силового воздействия штормовых волн на корпус корабля (рис. 29). Уже в ходе настоящего исследования обнаружена возможность полной гидродинамической компенсации бортовой качки корабля в условиях интенсивного морского волнения на глубокой воде. Изначально предполагалось, что если начальная остойчивость мала и период бортовой качки корабля значительно больше периода штормовых волн, то размах качки заметно уменьшается, а штормовые волны начинают свободно перехлестывать через палубу, создавая особые гидродинамические условия для реверсирования силового воздействия штормовых волн и полной компенсации бортовой качки.

Ключевые проектные решения для достижения наилучшей мореходности: эффективности и безопасности штормового плавания

Исходный поиск оптимальной формы корпуса корабля выполняется на основе интеграла Джона Генри Мичелла (1898), физическая и

геометрическая интерпретация которого позволяет выявить взаимосвязь между корабельным волнообразованием на больших скоростях хода и силовым воздействием на корпус корабля со стороны морского волнения. В практическом проектировании для оптимизации формы корпуса имеется вполне достаточный выбор гидродинамических и гидростатических сил, распределение которых вдоль корпуса определяются исключительно геометрическими особенностями судовых обводов.

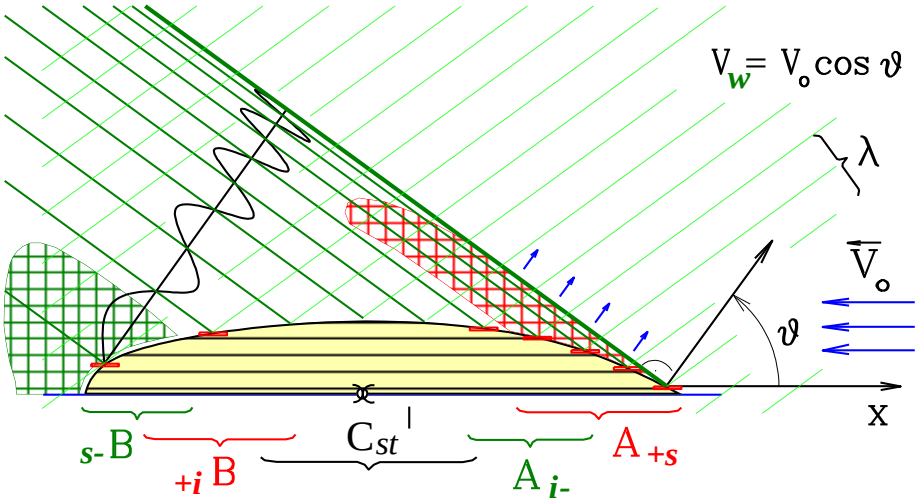


***Рис. 32. Волнообразование**, как процесс отражения волн от поверхности корпуса корабля. В зонах A+S и S–B происходит быстрый рост гребня трохоидальной волны, неспособной оторваться от корпуса судна*

$$A(\lambda) = \frac{M}{\lambda} \cdot \left| \int_{\Omega} q(x_0, y_0)\, e^{k\cdot(-z_0 + i\omega_0)} \delta\Omega_0 \right|$$

$$R_x = -\frac{\pi}{2} \cdot \rho V_0^2 \int_{\Lambda}^{0} A^2(\lambda) \cdot \frac{\delta\lambda}{\lambda \cdot M^3 \sqrt{M^2 - 1}}.$$

R_x – волновое сопротивление корабля при скорости движения V_0. Все величины в интеграле Мичелла приведены к размерным физическим функциям и аргументам: $A(\lambda)$ – амплитуда излучаемой корабельной волны; $M = \sqrt{\Lambda / \lambda}$ – соотношение длин для максимальной поперечной волны Λ к расчетной фазовой волне λ; $k = 2 \cdot \pi / \lambda$ – волновое число для данной фазовой волны; $\omega_0 = x_0 / M + y_0 \cdot \sqrt{M^2 - 1} / M$ – фазовый отсчет расчетной волны, излучаемой корпусом корабля.

Физико-геометрическая интерпретация гидродинамических процессов в интеграле Мичелла показывает механизм отражения от кор-

пуса корабля внешних волн, набегающих под косыми углами ϑ в диапазоне длин: $\lambda \in [\, 0 \div \Lambda = 2 \cdot \pi \cdot V_0^2/g]$, где: Λ – длина поперечной корабельной волны, соответствующая скорости хода V_0. В расчетах учитывается, что в оконечностях корпуса корабельная волна не может оторваться от корпуса и волновые процессы заменяются ударным суммированием амплитуд коротких волн в форме источника жидкости вблизи судовой обшивки.

В частном случае для анализа возникновения кренящих моментов оптимизация корабельных обводов сводится к поиску геометрических форм для пропуска штормовой волны через корпус корабля с минимальными искажениями, что должно обеспечиваться даже в условиях интенсивной вертикальной и килевой качки корабля на крупном штормовом волнении.

Корабль без бортовой качки на волнении

П*атент RU № 236 0827*

Непротиворечивое проектирование в качестве наивысшего приоритета считает гидродинамические принципы минимизации силового воздействия штормовых волн на корпус корабля, что неплохо согласуется с требованиями по достаточности запаса остойчивости на больших углах крена (динамической остойчивости корпуса) при предельно малой метацентрической высоте. Замечание о больших углах крена в означает малую и строго регулируемую вертикальную асимметрию формы подводных обводов и надводного борта, предотвращающих «ударные» гидростатические перегрузки *при быстрых качаниях поверхности штормовых волн*.

Форма мидельшпангоута в этом случае имеет отношение ширины к осадке, близкое к двум, что исключает «паразитное» возрастание плеч кренящих штормовых сил; обеспечивает малую изменчивость остойчивости формы корпуса на больших углах крена; и, соответственно, завершает концептуальное построение обводов и внешнего облика судна, оптимизированного для плавания произвольным курсом относительно штормовых волн с минимальной бортовой качкой.

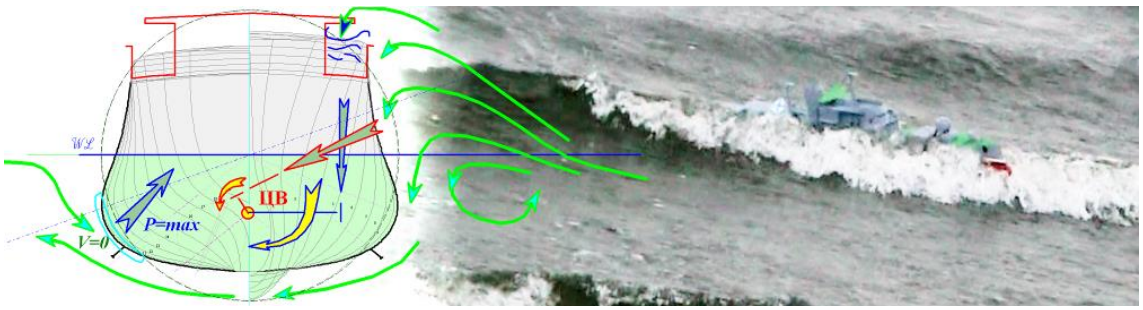


Рис. 33. Суммарные векторы сил *взаимно компенсируют кренящие моменты в гидродинамическом поле трохоидальных волн (слева). Момент перехлеста штормовой волны через палубу (справа)*

Указанные проектные тезисы применимы к различным классам морских судов. Рассмотрим вариант всепогодного быстроходного корабля, самые первые опытовые эксперименты с которым показали практически полную компенсацию штормовых кренящих сил на всех ходах под любым курсом относительно волн большой высоты.

Для исключения интенсивной бортовой качки в условиях штормового волнения в средней части корпуса устраивается завал борта порядка 10–20 град, который на уровне действующей ватерлинии является максимальным или образующим точку перегиба на шпангоутных контурах теоретического чертежа. Это позволяет учесть гидродинамические особенности крупных штормовых волн, всегда имеющих трохоидальную природу с распределением скоростей течений по круговым траекториям с переменным радиусом.

Вблизи заваленного надводного борта корабля гребни крупных штормовых волн притормаживаются только в своей нижней части. Это создает гидродинамические условия для затягивания потока жидкости под днище корабля, осадка которого должна быть соизмерима с полушириной корпуса. Интенсивный поток приводит к перераспределению гидродинамических давлений, отчего, с учетом дрейфового движения корабля по ветру, нулевая (критическая) скорость суммарных течений смещается на подветренный борт, чем компенсируется гидростатическая составляющая кренящего момента на наклонной поверхности штормовой волны. Затягивание волнового потока под корпус необходимо для образования компенсирующих вязкостных

сил на бортовых килях, так как иначе эти кили создают неблагоприятные кренящие моменты под действием дрейфового движения корпуса.

Корпус корабля, с вогнутыми шпангоутными контурами на уровне действующей ватерлинии, приобретает ярко выраженную S-образную диаграмму остойчивости, что позволяет безопасно снижать начальную остойчивость с целью увеличения периода бортовой качки без снижения критериев динамической остойчивости корабля в условиях штормового плавания в целом.

Корабль без килевой качки на ходу на волнении

***З**аявка № RU-2007133625 от 07.09.2007.*



***Рис. 34**. Оптимизированный по килевой качке корпус не имеет ходового дифферента на большой скорости на тихой воде (фото слева). На полном ходу по крупной волне динамическая стабилизация корпуса по дифференту не нарушается, и вся энергия волн трансформируется в вертикальную качку корпуса (в качестве движителя на опытовой модели установлено жесткое машущее крыло)*

Динамическая стабилизация килевой качки возможна на ходу корабля, если в форме корпуса корабля учтены гидродинамические особенности силового взаимодействия удлиненного корпуса с одиночными трохоидальными штормовыми волнами на глубокой воде.

Стабилизации килевой качки на больших скоростях хода способствуют скуловые обводы в носовой части корпуса, образующие плавно закрученную поверхность для затягивания набегающего потока под днище в районе скулы, в зоне образования первого гребня носовой корабельной волны (рис. 35). Проектный поиск оптимальной формы корпуса строится на исключении ходового дифферента на

больших скоростях хода на тихой воде (рис. 34), обеспечиваемого на всех осадках в полосе допустимой вертикальной качки корабля.

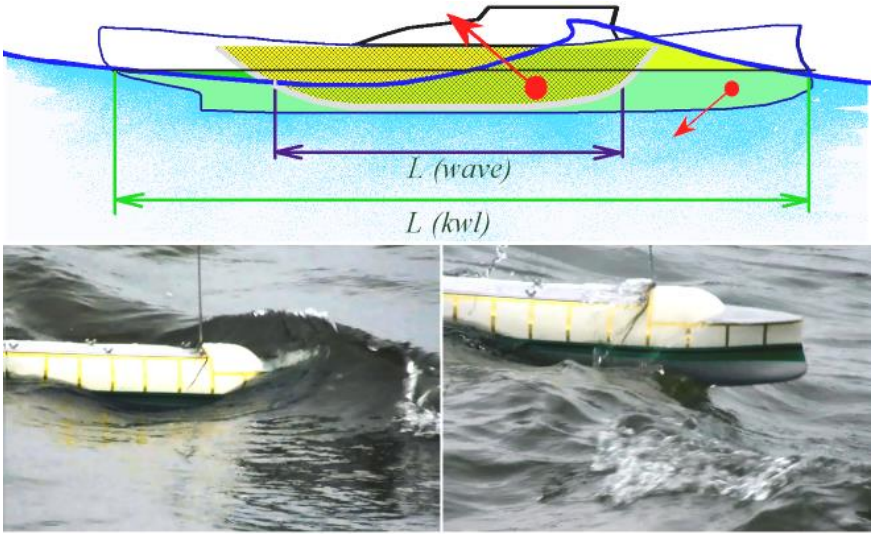


Рис. 35. Гидромеханика килевой качки *интерпретируется с использованием исторического понятия волнообразующей – волновоспринимающей длины корпуса L(wave), за пределами которой на L(kwl) корпус подпадает под прямые удары прогрессивных трохоидальных волн, где скуловые обводы и низкий надводный борт должны способствовать стабилизации качки*

Предотвращение интенсивной килевой качки на ходу корабля способствует поддержанию очень важных мореходных качеств, и позволяет оптимизированному кораблю:

v – сохранять высокую скорость хода в штормовую погоду;

v – идти любом курсом относительно штормовой волны;

v – значительно снизить заливаемость верхних палуб;

v –исключить глуюокую зарываемость под встречные волны;

v – избежать опасных захватов корпуса гребнями больших волн;

v – уменьшить ускорения внутри корпуса и улучшить надежность крепления и сохранность грузов.

Опытовые испытания оптимизированных моделей показывают, что на практике энергия штормовых волн не компенсируется в полной мере, и вместо килевой начинает проявляться усиление вертикальной качки корпуса. Вертикальная качка не столь сильно сказывается на снижении ходкости корабля, и в целом она не столь сильно отражает-

ся на условиях обитаемости, не способствует ударным волновым нагрузкам на корпус корабля.

В случае потери хода все стабилизационные гидродинамические эффекты исчезают и корабль вновь обретает вполне ощутимую килевую качку.

Корабль, остойчивый в штормовом плавании

Патент № 2487043 от 1 ноября 2012 г.

В концепции непротиворечивого проектирования принимается за основу форма корпуса судна с заостренной крейсерской кормой и малым объемом надводного борта в носовой оконечности, что обеспечивает способность к поддержанию активного хода с минимальной килевой качкой в режиме прорезания гребней штормовых волн. Такое судно имеет слабо изменяющуюся строевую по ватерлиниям, и, соответственно, ослабленное демпфирование вертикальной качки, и потому желательна отработка гидростатических зависимостей для сохранения остойчивости при изменениях осадки в условиях интенсивной штормовой качки.

Для современных судов с широкой транцевой кормой и большим развалом надводного борта в носовой оконечности характерна интенсивная килевая качка во избежание заливаемости верхних палуб, что существенно повышает гидродинамическое воздействие при посадках корпуса на гребне и над подошвой штормовых трохоидальных волн. Тем не менее, гидростатический подход позволяет выделить предпосылки снижения штормовой мореходности корабля, а в случае специально оптимизированного корпуса задает главные компоненты силового воздействия крупных штормовых волн, также и в компромиссе с использованием развала борта выше действующей ватерлинии.

В штормовом море действующая ватерлиния мечется между уровнями подводных скул и верхней палубой, определяя, тем самым, непредсказуемость силового воздействия волн на корпус судна в целом, с принципиальной возможностью возникновения разрушитель-

ных гидродинамических ударов на плоскостях верхней палубы и развалленных поверхностях бортовой обшивки судна.

Для достижения плавности качки в штормовом плавании судоводитель старается минимизировать поперечную остойчивость корабля., что востребует дополнительные конструктивные решениях для сохранения остойчивости в условиях вертикальной качки, способствующие восстановлению начальной остойчивости при любых изменениях посадки корпуса корабля в условиях интенсивной вертикальной качки.

Морское судно представляется динамически противоречивым объектом, в котором стремление к улучшению какого-либо одного мореходного свойства обязательно откликается ослаблением других качеств корпуса, вплоть до неразрешимых эксплуатационных проблем с мореходностью однобоко модифицированного судна в целом. Так, повышение остойчивости приводит к усилению качки, вплоть до возникновения катастрофических проблем с прочностью корпуса, или, что является чистым парадоксом – возникновению опасности именно опрокидывания судна под ударами гребней крупных волн, или жесткого гидродинамического захвата штормовой волной – брочинга. Значительные сложности в эксплуатации судов возникают при несоизмеримом завышении надводного борта и запаса плавучести судна, при реализации других несогласованных с мореплавателями требованиях по незаливаемости верхних палуб, в устройстве громоздких спасательных сооружений, которые также могут обращаться источником повышенной опасности для мореплавателей.

Некоторые элементы в построении формы корпуса судна хорошо зарекомендовали себя в истории мореплавания, а ныне их использование нередко забывается в угоду технологичности грузообработки, для расширения внутрисудовых помещений, иногда же просто по эстетическим пристрастиям конкретных менеджеров корабельных наук.

Оптимальное разрешение парадоксов предопределяет возможность поиска взаимной компенсации внешних негативных штормовых воздействий на корпус судна с помощью построения специальных обводов. Рассмотрим особенности некоторых элементов формы корпуса судна:

B – ширина корпуса в кубической зависимости увеличивает метацентрический радиус *r*:

$$r = J_X/V = \frac{2}{3}\int_{x_K}^{x_H} y^3 dx\Big|_{WL} \qquad (1)$$

где: *V* – водоизмещение; J_X – поперечный момент инерции площади действующей ватерлинии относительно продольной оси *x*; *y* – ордината ватерлинии, как ширина корпуса в конкретной точке продольной оси *x* на уровне действующей ватерлинии *WL*.

В штормовом плавании внешние силы при наклонах поверхности моря обращаются ничем не скомпенсированными кренящими моментами – обратными моментами остойчивости формы:

$$m_\vartheta = \gamma \cdot r \cdot V \cdot \sin(\vartheta) = \gamma \cdot J_X \cdot \sin(\vartheta) \quad (2)$$

где: γ = 1025 кг/м^3 – плотность воды, ϑ – угол наклона поверхности моря.

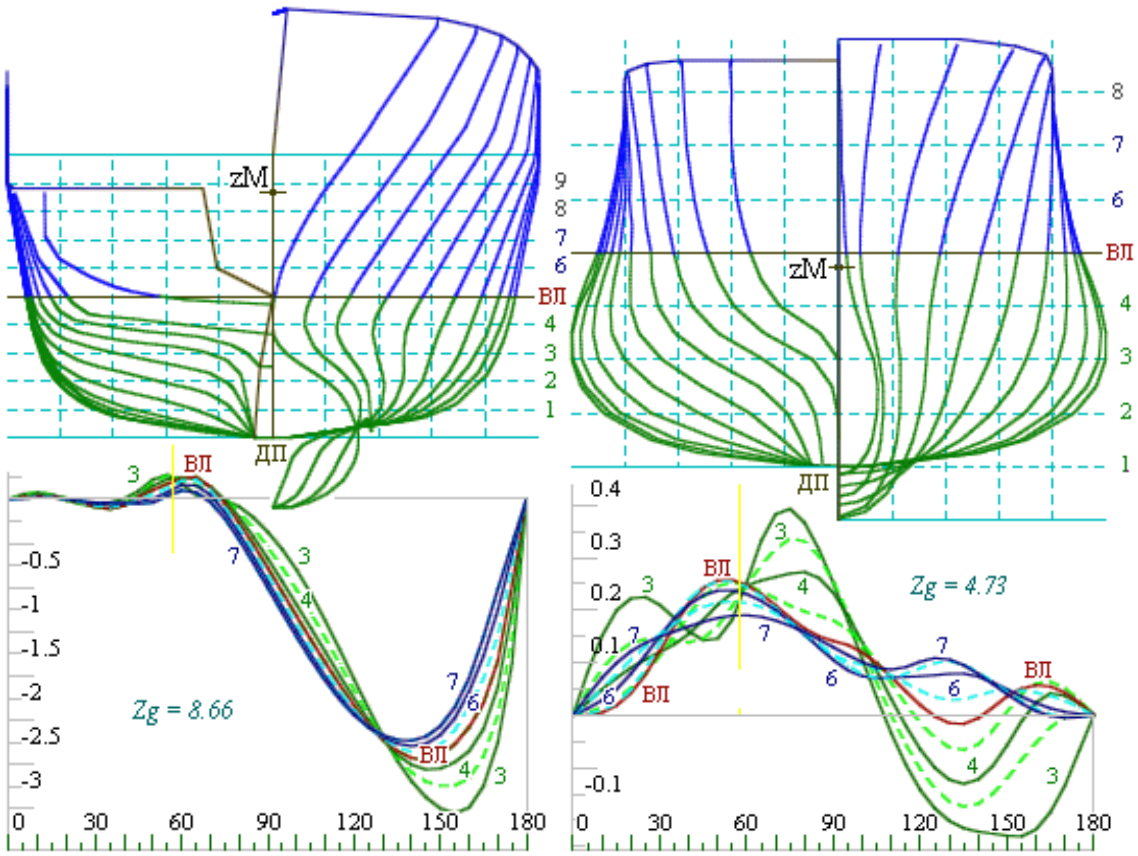
Обратим внимание, что при высокой метацентрической высоте реакция массы корпуса работает на усиление крена, и кренящий момент достигают наибольших величин у судов с широкой транцевой кормой (рис.36), и особо опасен для многокорпусных судов, так как вне зависимости от реальной площади их ватерлиний в расчеты метацентрического радиуса входят кубические ординаты габаритных размерений.

Для достижения плавности и умерения размаха бортовой качки в штормовом плавании судоводитель всегда стремиться уменьшить метацентрическую высоту, приподняв центр масс судна ближе к метацентру, тем самым добиваясь плавности качки за счет подавления внешних сил инерцией массы корпуса, что задается капитанской формулой для оценки начальной остойчивости:

$$T_\vartheta = C \cdot B / \sqrt{h} = C \cdot B / \sqrt{r + z_C - z_g} \quad (3)$$

где: $C \approx 0{,}8$ [с/м$^{1/2}$] – размерный эмпирический коэффициент с характерным значением для традиционных однокорпусных транспортных судов; z_C – аппликата центра величины; z_g – аппликата центра тяжести.

Если аппликата центра тяжести поднимается много выше ватерлинии (рис.36-а), то судно как бы оказывается в качелях интенсивной качки еще и под боковыми ударами штормовых волн.



а) Снижение начальеной остойчивости – недопустимо. Естественное устойчивое положение корпуса с большим развалом борта на уровне действующей ватерлинии – «кверху килем».

b) Метацентрическая высота оптимизированного корабля может безопасно приводиться к нулю на конструктивной осадке, положительная остойчивость восстанавливается при любых изменениях посадки.

Рис. 51. Диаграммы статической остойчивости традиционного и оптимизированного корабля *для пяти штормовых ватерлиний, с аппликатой центра тяжести в метацентре по конструктивной осадке.*

Метацентрическая высота оптимизированного корабля может безопасно приводиться к нулю на конструктивной осадке (рис.36-б), так как положительная остойчивость восстанавливается при любых изменениях посадки в темпе штормовой качки судна. Такой корпус в

дополнение обретает значительный запас для поддержания абсолютной остойчивости, условно достаточной для выхода на ровный киль даже из полного опрокидывания

Контуры шпангоутов в средней части оптимизированного судна приближены к окружности, что отмечается отношением ширины к осадке (B/T) порядка двух, и, соответственно, аппликата метацентра приводится к уровню действующей ватерлинии, где горизонтальные удары гребней штормовых волн могут быть скомпенсированы, вплоть до приведения внешних сил к обратному действию.

Гидростатика килевой качки для удлиненного судна не дает возможности аналогичной взаимной компенсации внешних сил с помощью инерции массы корпуса, слишком велика продольная остойчивость формы в сопоставлении с допустимой прочностью корпуса, и потому обводы могут лишь оптимизироваться для непротивления силовому воздействию штормовых волн, при котором темп килевой качки происходит в режиме простого отслеживания поверхности взволнованного моря.

Вернемся к уточнению гидростатических оптимизационных решений для конкретных проектов морских судов повышенной мореходности с выбором формы корпуса без недочетов в «опасную сторону», что обычно свойственно для проектных выводов использованием моделей гидростатической постановки судна на штормовую волну.

Метацентрический анализ остойчивости при изменении осадки судна

Оценка остойчивости корпуса корабля с вертикальными бортами характеризуется величиной метацентрической высоты h, на изменение которой при вертикальной качке сказывается смещение центра величины z_C, отчасти компенсируемое обратной зависимостью синхронно меняющегося объемного водоизмещения V.

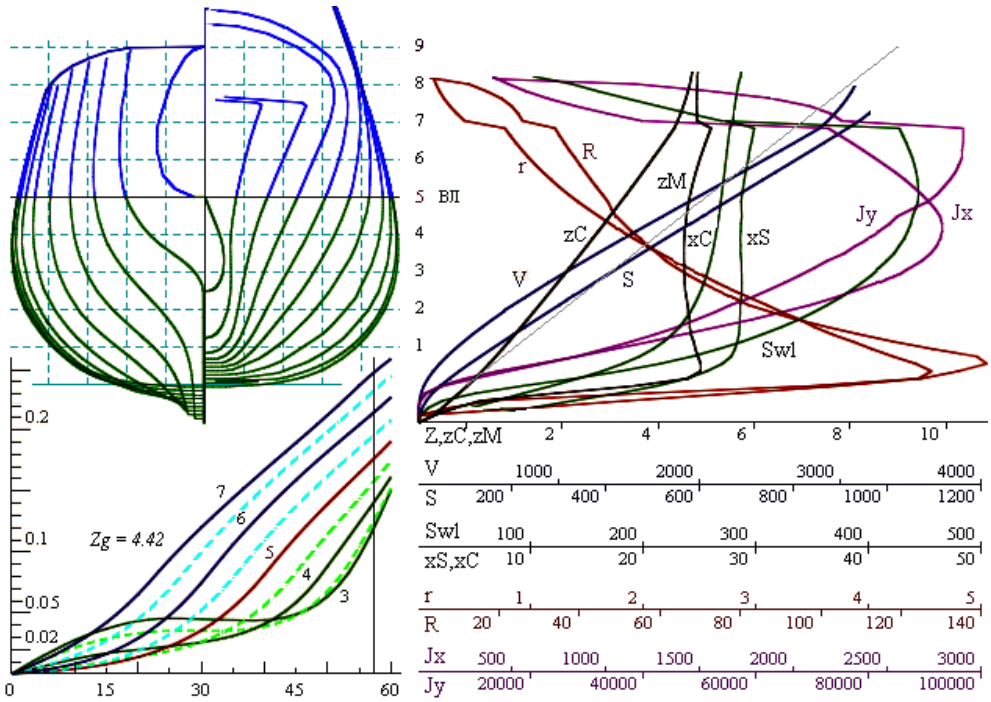


Рис. 37. Проекция корпус теоретического чертежа и гидростатические расчеты для спасательного судна*, способного в штормовых условиях активно маневрировать произвольными курсами на малых ходах вблизи спасаемого судна или морского инженерного сооружения. Диаграммы плеч остойчивости (слева) для различных осадок, отмеченных на проекции корпус теоретического чертежа (слева вверху). Расчет остойчивости выполнен для Zg=Zm на конструктивной осадке (ВЛ). При всех изменениях осадки корпус обретает положительную начальную остойчивость. Кривые элементов теоретического чертежа (справа). Здесь и далее на графиках приведены z_C, z_M – апликаты центра величины и метацентра; V – грузовой размер; S – площадь смоченной поверхности корпуса; S – площадь действующей ватерлинии; x_S, x_C – абсциссы центра величины и площади ватерлинии; J_x, J_y – продольный и поперечный моменты инерции площади ватерлинии; R, r – продольный и поперечный метацентрические радиусы*

Зафиксируем положение центра тяжести и допустим условно неизменной величину поперечного (относительно продольной оси x) момента инерции площади действующей ватерлинии J_x :

$$h = z_M - z_g = r + z_C - z_g = J_x/V + z_C - z_g\,, \qquad (4)$$

где: z_M – аппликата метацентра; z_g – фиксированная аппликата центра масс корабля; r – поперечный метацентрический радиус.

Все величины в выражении (4), кроме z_g, представляются интегральными характеристиками формы судовых обводов и функционально связаны с посадкой корпуса, что отражается на кривых элементов теоретического чертежа (рис.37,38 – *справа*).

В случае судовых обводов с вертикальными бортами в средней части корпуса, искомый экстремум минимума аппликаты метацентра z_M приходится на осадку T в три раза меньшую ширины корпуса B. Соответственно, для судовых обводов с отношением ширины к осадке больше трех ($B/T > 3$), минимум аппликаты метацентра $z_M(z)$ достигается при развале бортов за счет быстрого роста $J_X(z)$ на метацентрической диаграмме (рис.37,38 – *справа*). Штормовое плавание такого судна сопровождается резкой килевой и бортовой качкой при интенсивном гидродинамическом влиянии на корпус корабля штормовых волн, силовое воздействие которых может превалировать на фоне положительных гидростатических эффектов, тем не менее, сохраняющего полезное влияние на минимизацию качки и достижение безопасности штормового мореплавания.

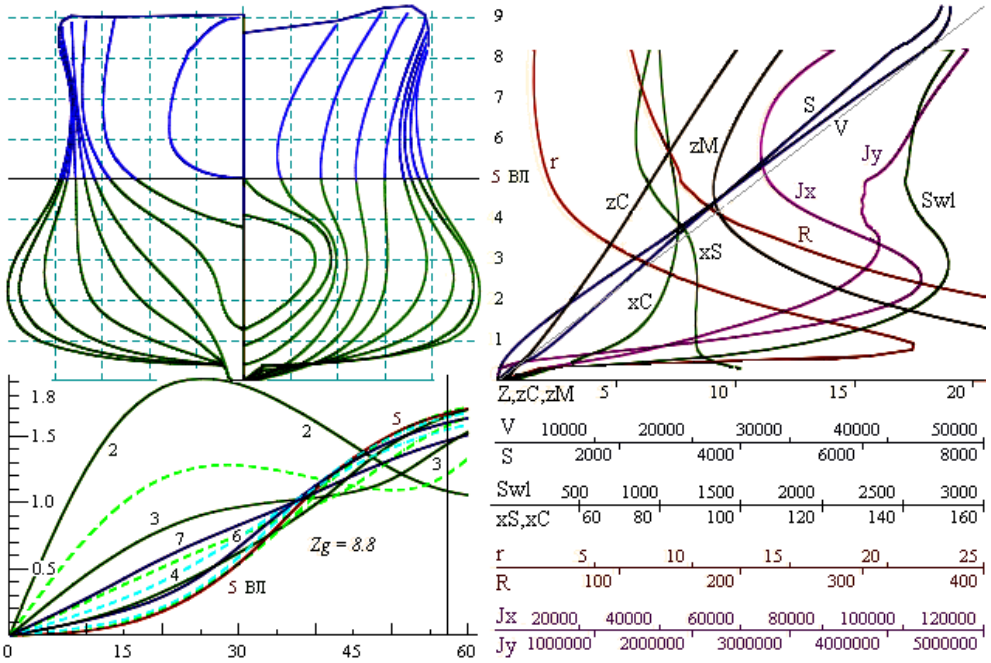


***Рис. 38. Универсальное транспортное судно**, способное к штормовому плаванию произвольным курсом с минимальной килевой и бортовой качкой в условиях интенсивного морского волнения.*

Судно повышенной штормовой мореходности (рис.38), имеющее отношение ширины корпуса к осадке приблизительно равное или меньшее двух ($B/T \cong$ или ≤ 2), обретает искомый минимум остойчивости на конструктивной ватерлинии при устройстве завала бортов в средней части корпуса, способствующего росту аппликаты метацентра $z_M(z)$ за счет увеличения момента инерции площади ватерлинии $J_X(z)$ при всплытии корпуса, и не подавляющем естественного прироста высоты метацентра $z_M(z)$ при естественном увеличении аппликаты центра величины $z_C(z)$ в фазе погружения корпуса при вертикальной качке на штормовом волнении.

Судовые обводы с округлыми шпангоутами в средней части корпуса значительно ослабляют эффект повышения остойчивости при изменении осадки (рис.37), и потому значимым становится более строгий контроль поддержания безусловно положительной остойчивости корабля в штормовом плавании с помощью построения специальных обводов корпуса в полосе переменных ватерлиний. Максимальный эффект повышения остойчивости при штормовом изменении посадки достигается в случае использования вогнутых на уровне действующей ватерлинии шпангоутных контуров (рис.38).

Количественная характеристика особенностей формы корпуса (рис.37,38 – *справа*) связана с условием взаимной компенсации изменений момента объема корпуса $z_C \bullet V$ относительно основной линии за счет момента инерции площади действующей ватерлинии J_X. Геометрически это сводится к оптимизации величины наклона борта в средней части корпуса на уровне конструктивной ватерлинии.

На графиках слева внизу приведены диаграммы остойчивости, где кривая 5 соответствует конструктивной осадке, кривые 6 и 7 – погружению корпуса на соответствующие ватерлинии, отмеченные на теоретическом чертеже выше, кривые 4, 3 и 2 – соответственно всплытию корпуса. Все расчеты выполнены для фиксированного положения аппликаты центра масс z_g , приведенного точно к метацентру на конструктивной осадке, где начальная остойчивость становится равной нулю ($h_{KWL} = 0$).

На графиках справа приведены кривые элементов теоретического чертежа в функции от осадки по корпусу судна, изображенного слева. Ниже графиков приведены шкалы с отсчетами гидростатических величин. Расчеты выполнены с использованием программного комплекса Hull, № Г/р 2010615849.

Гидростатические оценки штормовой мореходности применимы для всех классов кораблей и судов, и в том числе должны включаться в наставления мореплавателям для действующих судов и береговых служб наблюдения за флотом, что может способствовать повышению эффективности и разумной смелости судовождения в сложных штормовых и ледовых условиях. В проектировании судов гидростатические оценки мореходности представляются базовым уровнем для последующей проектной оптимизации корабля с глубокой отработкой всех процессов гидроаэромеханики взаимодействия корабля со штормовыми волнами и ураганным ветром.

Надводный борт и верхняя палуба корабля

Заявка на изобретение: **№ RU-2016150045** от 2016-12-19.

Борт и палуба корабля представляются главными проектными компонентами обеспечения эксплуатационных и мореходных качеств в условиях мореплавания на интенсивном волнении, проектные характеристики которых должны особо согласовываться по навигационным условиям и эксплуатационным требованиям к кораблю в различных гидрометеорологических или штормовых регламентах ведения морских работ.

В качестве концепции проектирования используются инженерно-технические принципы непротивления силовому воздействию гребней волн и штормового ветра, что предполагает гидродинамическую взаимокомпенсацию качки, с достижением комфортности обитания экипажа и сохранности крепления грузов и судового оборудования.

Надводный борт и прилегающие фрагменты верхней палубы оптимизируются по требованиям эффективного ведения палубных работ в различных условиях эксплуатации корабля, с учетом необходимости

минимизации качки и достижения наилучшей ходкости и маневренности в условиях интенсивного штормового волнения, отражающихся в инженерных заключениях при назначении высоты надводного борта и распределении прилегающих к борту фрагментов верхней палубы:

– высота надводного борта по всему периметру корпуса корабля оптимизируется из условия равнообъемной заливаемости верхней палубы на ходу корабля в условиях интенсивного волнения, при которой основная масса воды на верхней палубе частично компенсирует дифферентующее и кренящее действие наиболее крупных и опасных гребней штормовых волн;

– при интенсивной заливаемости верхней палубы основная масса воды временно удерживается на прилегающем участке открытой верхней палубы, при этом:

1) непрерывные вдолькорпусные рубки и громоздкие палубные устройства не позволяют потокам воды свободно перетекать на противоположный борт, в то время как фальшборты со штормовыми портиками удерживают значимый уровень воды на палубе в течение полупериода бортовой качки;

2) при заливании на палубу бака крупного гребня встречной волны, быстрый поток воды подламывается и в значительной мере сбрасывается за борт с помощью относительно высокого носового волнолома;

3) активная площадь палубы низкобортного юта уменьшается устройством узкой крейсерской кормы, бортовых уступов для траловых досок, или установкой палубных рубок и громоздких судовых устройств, не допускающих удержание на верхней палубе вихревого водоворота из попутных гребней штормовых волн, предотвращая тем самым риск гидродинамического захвата корпуса с возникновением опасного брочинга;

– по всему корпусу корабля, для снижения внешнего силового воздействия штормовых волн, устраивается предельно малая высота борта с относительно малой шириной и площадью прилегающей верхней палубы, либо с ощутимым завалом борта для уменьшения

общей ширины палубы. По необходимости, объемные надстройки и широкие палубы устраиваются выше над открытой верхней палубой.

На двух чертежах приведены варианты формирования надводного борта и верхней палубы корабля. В первом варианте корабль пгостроен с относительно высоким надводным бортом с завалом, что также способствует заметному уменьшению ширины верхней палубы (рис.39). Вариант рыболовного судна (рис.40) с предельно низким надводным бортом и максимально широкой рабочей палубой. Проектными решениями достигается возможность всесезонного и всепогодного выполнения палубных и забортных работ в особых навигационных и гидрометеорологических условиях, под штормовым ветром и на интенсивном волнении открытого моря.

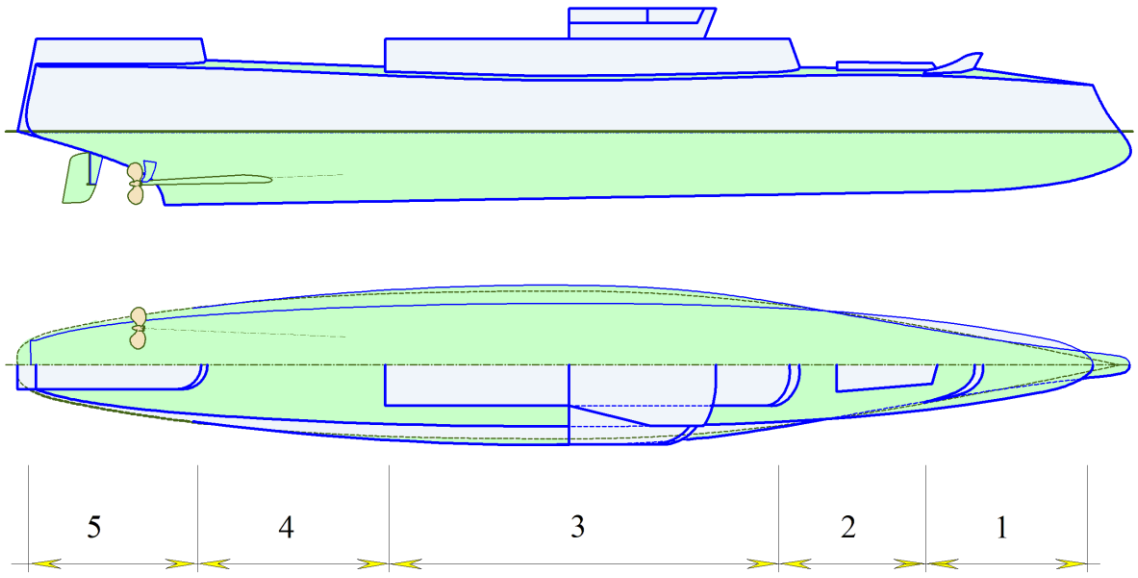


Рис. 39. Вариант инженерного построения и геометрической оптимизации корпуса *корабля с относительно высоким и заваленным внутрь надводным бортом, со значительно зауженной шириной верхней палубы. Форштевень предельно малой высоты и сильно завален, что служит обеспечению штормовой ходкости в режиме прорезания гребней особо крупных волн. Длинная вдолькорпусная рубка предотвращает перехлест гребней штормовых волн через всю палубу корабля в средней части корпуса.*

На чертежах размечены характерные участки верхней палубы, отвечающие функциональному предназначению корабля:

1. Повышенная заливаемость бака ограничивает доступ команды для обслуживания палубных устройств, что востребует задействова-

ние дистанционного управления якорно-швартовными устройствами, так же как и использовании систем постановки – выборки забортных устройств специального назначения.

2. На носовой палубе корабля (рис.39), за волноломом, располагаются горловины трюмов и барбеты вооружений, у рыболовного судна (рис.40) этот участок носовой палубы укрывается герметичной надстройкой;

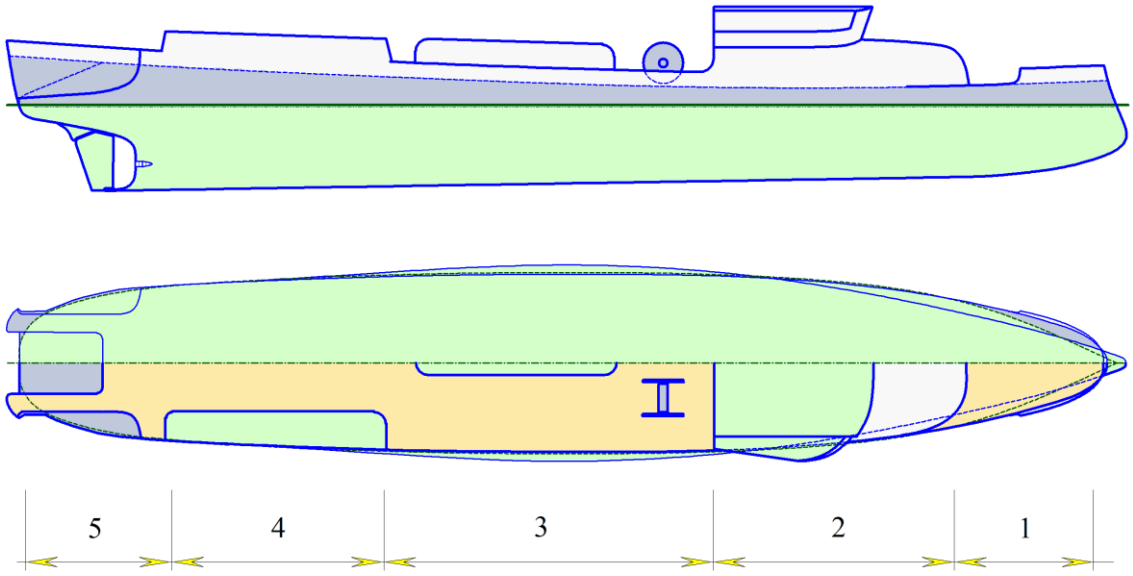


***Рис. 40. Формирование общекорабельной архитектуры рыболовного судна** с предельно низким надводным бортом для обеспечения эффективной и безопасной работы траловой команды в условиях штормовых ветров и интенсивного волнения на море. Необходимый запас плавучести обеспечивается включением в герметичный контур корпуса носовой надстройки и палубных тамбучин.*

3. В средней части корпуса высокобортного корабля располагается протяженная рубка, препятствующая перетоку воды по верхней палубе на подветренный борт. На широкой промысловой палубе рыболовного судна за фальшбортами укрываются громоздкие траловые и кабельные лебедки, которые разделяются удлиненной тамбучиной в диаметральной плоскости траулера. Общая площадь портиков и шпигатов под фальшбортом обеспечивает слив воды за время полупериода штормовой волны, тогда как заливание или зачерпывание нового потока происходит практически мгновенно во второй полуфазе под воздействием крупного гребня последующей штормовой волны.

4. Кормовая секция на ходу корабля менее всего подвержена вертикальной качке, и потому здесь целесообразно размещать сложное палубное оборудование или устраивать вертолетные площадки. На рыболовном судне в укрытом бортовыми тамбучинами секторе траловой палубы выполняются наиболее ответственные операции с переключениями кабелей и ваеров, с параллельной подготовкой поднимаемого трала к выливке рыбы и дублирующей постановкой нового трала по противоположному борту.

5. Ют является наиболее комфортным участком верхней палубы корабля, где в случае транспортных или пассажирских судов целесообразно устраивать прогулочные палубы. На ходу корабля ют весьма спокойное место, однако при потере хода, что происходит, например, при выборке трала, широкая корма подвергается интенсивному воздействию штормовых волн с высокой заливаемостью верхней палубы. По первому варианту (рис.39) на корабле располагается ангар и аппарель спускаемых аппаратов, что весьма важно ввиду особой сложности и опасности спуско-подъемных работ в штормовом море, на рыболовной судне (рис.40) – слип кормового трала, зона повышенного внимания экипажа и траловой команды, особенно в моменты подъема трала, когда судно становится на курс по волне.

Перечисленные инженерные решения эффективны в случае комплексного применения, с оптимизацией их геометрических размерений и инерционных характеристик для конкретных географических и навигационных условий эксплуатации кораблей и судов.

«Форштевень и скула корабля»

Патент № RU-2607136.

Форштевень и скуловые обводы быстроходного надводного корабля (рис.41) или относительно тихоходного гражданского судна (рис.42) устанавливают главные особенности взаимодействия корпуса со штормовым волнением, и создают условия для практического обеспечения автономного плавания судна в ледовых полях средней сплоченности.

Для достижения оптимальной ходкости и уверенной маневренности на интенсивном штормовом волнении; во избежание опасного обледенения верхних палуб; и обеспечения возможности автономного плавания в ледовых условиях дальневосточных морей России, носовая часть корпуса быстроходного надводного корабля (рис.41) или относительно тихоходного гражданского судна (рис.42) должны строиться с использованием следующих инженерно-технических и конструктивных элементов в устройстве форштевня, скуловых обводов и надводной части носовой оконечности корпуса:

– установка вертикального (рис.42) или немного заваленного в корму (рис.41) заостренного штевня на высотах от палубы бака до подводного уровня в диапазоне переменных ватерлиний, при плавании на умеренном волнении моря (примерно на одну треть осадки), для безударного прорезания гребней штормовых волн и удержания в надводном положении контактной кромки разламываемых ходом корабля ледовых полей, с недопущением заныривания обломков льдин под скулу и днище корпуса;

– устройство штормового подреза в нижней части форштевня (рис.41, рис.42–6) на протяжении от гладкого слияния с линией киля и наклоном около 20-30 градусов от горизонтали в области сопряжения с вертикальным (таранным) упрочнением форштевня на уровне от основной линии порядка двух третей осадки, что необходимо для предотвращения рыскания в условиях интенсивной бортовой и килевой качки при активном движении и маневрировании корабля на крупном волнении;

– особое упрочнение таранной части форштевня на уровнях непосредственного воздействия ледовых полей и торосов (рис.41, рис.42–4), рассчитанное на предельные усилия при ударных нагрузках для раскола ледового поля на скоростях хода до 6 узлов (например, при движении с тралом), или с возможной полной остановкой корабля на скоростях до 3-4 узлов для последующего создания максимальной упорной нагрузки с вектором усилия на небольшой подъем ближайшей кромки ледового поля для предотвращения ухода под днище корабля контактной кромки ледовых обломков, что также

способствует сохранению начальной остойчивости, которая для снижения бортовой качки в штормовых условиях должна поддерживаться на предельно низком или нулевом уровне;

– форштевень естественным образом создает упор отчасти затупленной и очень прочной частью форштевня в нижних слоях ледового поля (рис.41, рис.42–4), где лед разогрет до температуры воды, а заостренный форштевень в надводной части (рис.41, рис.42–3) создает критические колющие напряжения на поверхности крупных льдин, где особая твердость и колкость ледового покрытия обусловливается низкими температурами охлаждающего сверху воздуха;

– надводные ветви носовых шпангоутов могут иметь небольшой развал (рис.41) для гидродинамической компенсации возможного зарывания носовой части корпуса под гребни встречных волны при движении корабля на большой скорости хода, или же иметь завал верхней части шпангоутных контуров и заниженную высоту до точки сопряжения с ширстречным поясом верхней палубы тихоходных судов (рис.42), что требуется для компенсации килевой и вертикальной качки за счет приема на носовую палубу больших потоков воды из гребней штормовых волн;

– за счет слабовыраженного бульбового образования в нижней части таранного форштевня (рис.41, рис.42–4) бортовая обшивка в диапазоне переменных ватерлиний образует винтообразную поверхность (рис.41, рис.42–5) по спрямленным фрагментам шпангоутов на протяжении от форштевня до зоны отрыва от корпуса гребней расходящейся корабельной волны (в том числе соизмеримой по длине с внешними штормовыми волнами), что затягивает встречные потоки воды и волновые гребни под носовую скулу и днище корпуса, обеспечивая динамическую стабилизацию корабля на больших скоростях хода, и, как следствие, способствует лучшей ходкости и меньшей качке в условиях интенсивного штормового волнения;

– сразу за участком ватерлиний в зоне отрыва расходящейся корабельной волны может начинаться выпуклый изгиб шпангоутных контуров с образованием булей и завала борта на уровне действую-

щей ватерлинии в средней части корпуса (рис.41, рис.42–7), что необходимо для гидродинамической компенсации бортовой качки при плавании произвольным курсом относительно штормового волнения, а также создает условия для расталкивания крупных плавающих льдин под окружающие ледовые поля и, как следствие, предотвращение затягивания ледовых обломков в зону винто-рулевого комплекса по кормовым подзором, с возможностью создания ледового канала за кормой корабля.

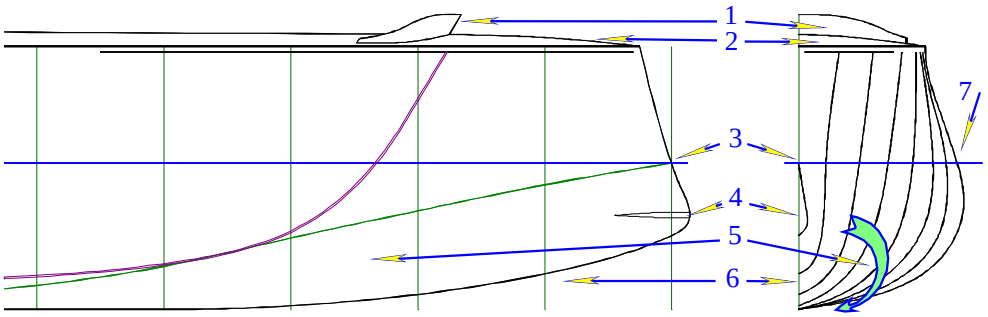


***Рис. 41. Носовая часть корпуса быстроходного корабля**, способного активно маневрировать в условиях ураганных ветров, штормового волнения и автономного плавания в обстановке средней ледовой сплошности.*

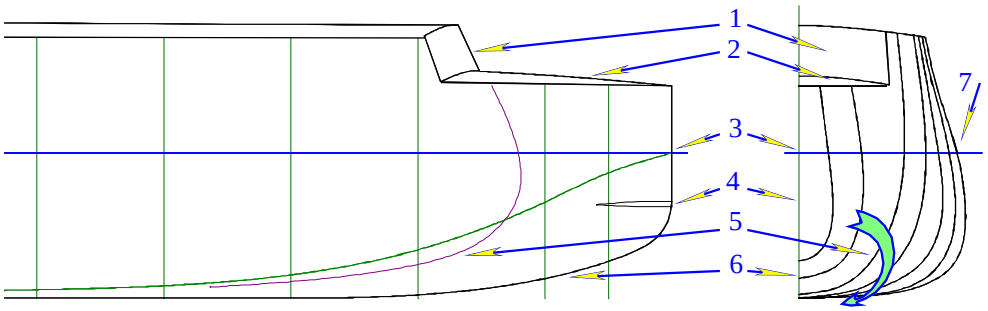


***Рис. 42. Носовая часть корпуса тихоходного транспортного судна**, способного удерживать заданное направление движения относительно малыми ходами в условиях ураганных ветров, штормового волнения и автономного судоходства в обстановке средней ледовой сплошности.*

На чертежах цифрами отмечены следующие конструктивные особенности судовых обводов в носовой части корпуса:

1. Волнолом быстроходного корабля (рис.41) и лобовая переборка шельтердечной надстройки тихоходного транспортного судна (рис.42), укрывающих экипаж от прямых ударов волн при необходимости работы на верхней палубе в свежую погоду;

2. Существенное уменьшение надводного объема в носовой части корпуса устраивается из принципа гидродинамической (рис.41) и гидростатической (рис.42) компенсации килевой и вертикальной качки, что достигается за счет приема на низкую палубу бака больших по объему потоков воды из встречных гребней штормовых волн. Уменьшение высоты и площади верхней палубы бака предотвращает накопление больших масс льда в условиях ветрового обледенения, интенсивность накопления которого снижена или вовсе исключается при интенсивном заливании штормовыми волнами.

3. Заострение форштевня на уровне действующей ватерлинии позволяет создавать плавно закрученную винтовою поверхность (геликоид) из спрямленных шпангоутных контуров для закручивания набегающего потока под днище корпуса, что требуется для гашения обрушающегося гребня расходящейся корабельной волны и аналогичного подтапливания и пропуска через корпус гребней штормовых волн, вовлекаемых в скуловой круговорот со всех видимых встречных курсов.

4. Таранное упрочнение форштевня, достаточное для ударного разрушения крупных льдин без остановки корабля на скорости до 6 узлов, или безопасно останавливающее корабль при столкновении с непроходимыми льдами или торосами на скорости до 3-4 узлов, с последующим созданием упорного усилия для подвижки ледовых полей и создания трещин или разводий для поиска путей прохода корабля в сплошных льдах.

5. Скуловые обводы корпуса корабля повышенной штормовой мореходности образуются плавно закрученной винтовой поверхностью и оптимизируются по условиям минимизации расходящейся корабельной волны и ходового дифферента на больших скоростях хода на тихой воде, с последующей отработкой формы и высоты надводных ветвей шпангоутов для гидродинамической и гидростатической компенсации килевой и вертикальной качки в условиях интенсивного регулярного и ветрового волнения с групповой структурой пакетов волн и ярко выраженными гребными девятых валов.

6. Штормовой подрез форштевня для раскрепощения свободного рыскания и обеспечения удовлетворительной маневренности корабля в условиях крупного штормового волнения.

7. Завал борта на уровне действующей ватерлинии способствует гидродинамической компенсации бортовой качки корабля, а также перехватывает приподнятые гребнем корабельной волны ледовые поля и не допускает их затопление и затягивание в район винто-рулевого комплекса в кормовой части корпуса.

Вышеперечисленные конструктивные особенности в едином комплексе инженерно-технических решений способствуют улучшению ходкости, маневренности и умерению качки в условиях интенсивного штормового волнения, а также предотвращают опасное набрызговое обледенение судовых устройств на верхней палубе корабля, и обусловливают возможность автономного плавания в режиме ледореза во льдах средней тяжести, при котором длительным по времени упором главных машин разделяются ледовые поля без опасных ударных нагрузок на корпус корабля. Безопасность плавания во льдах обеспечивается особой прочностью заостренного форштевня, и, возможно, устройством двойных бортов с малыми герметичными отсеками в носовой части корпуса на случай аварийной разгерметизации конструкций форштевня или прорыва обшивки корпуса в сопряжен

«Ахтерштевень и кормовой подзор корабля»

Патент № RU-2607635.

Настоящей технической разработкой воссоздается метод построения кормовой оконечности и обводов корабля для достижения ходкости при минимуме качки в условиях штормового плавания, обеспечиваемых устойчивой работой винто-рулевого и стабилизационного комплекса под кормовым подзором надводного корабля.

Кормовая скула, ахтерштевень, раковина и подзор винто-рулевого комплекса устраиваются в одно- или в двухвинтовых вариантах установки движителей, с возможностью использования стабилизаторов килевой и бортовой качки в ускоренных потоках непосредственно за гребными винтами (рис.43, рис.44).

Рассматривается единый и унифицированный комплекс инженерно-технических решений:

– на уровне переменных ватерлиний создается винтовая поверхность на протяжении от бортовых булей до раковины, которая предотвращает отрыв высокочастотной составляющей корабельной волны и ее гашение в интерференции с поперечной компонентой корабельной волны;

– такая винтовая поверхность приводит к естественному заострению раковины крейсерской кормы, что предотвращает удары волн и опасные захваты кормы корабля (брочинга) гребнями девятых валов;

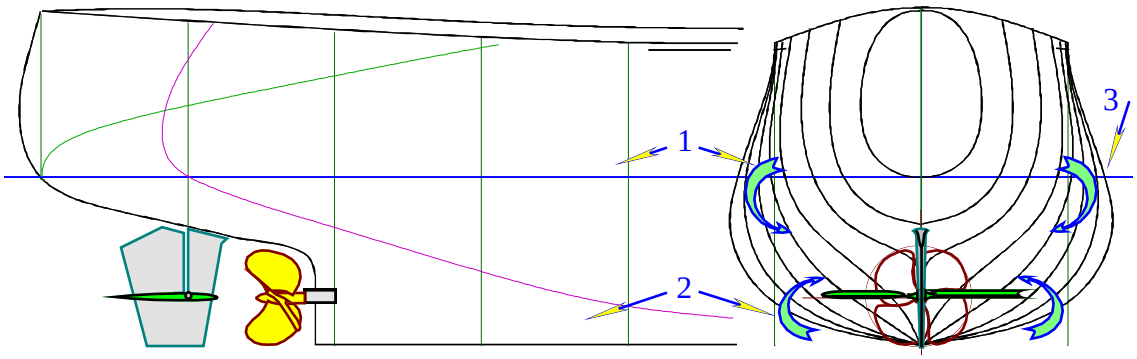


Рис. 43. Кормовая скула, подзор, раковина и ахтерштевень *одновинтового корабля, оптимизированные по условиям минимизации ходового дифферента, корабельного волнообразования и, как следствие, ожидаемого уменьшения силового воздействия на корабль со стороны штормового волнения за счет пропуска штормовых трохоидальных волн через корпус корабля с минимальными искажениями, и что, в случае остановки гребных винтов, обеспечивает большой размах с вертикальными компонентами скоростей жидкости в гребнях штормовых волн, необходимых для активизации крыльевых успокоителей килевой и бортовой качки в качестве пассивных штормовых крыльевых движителей на упруго проворачивающихся горизонтальных баллерах. Одновинтовая схема винто-рулевого комплекса имеет консольное исполнение кормовой раковины, что требуется для предотвращения оголения гребного винта в условиях интенсивной килевой качки в штормовом плавании.*

– заостренная корма служит возможности задействования штормовых движителей для удержания безопасного курса при минимальной тяге от упругой реакции баллеров крыльевых движителей;

– от днища до ахтерштевня создается вторая винтовая поверхность со встречным закручиванием потока, компенсируемого под кормовым подзором в области действия руля и крыльевых успокоителей качки;

– направленная вверх суммарная компонента течений под кормовым подзором предотвращает затягивание битого льда в зону винто-рулевого комплекса, и способствует удержанию ледового канала за кормой корабля.

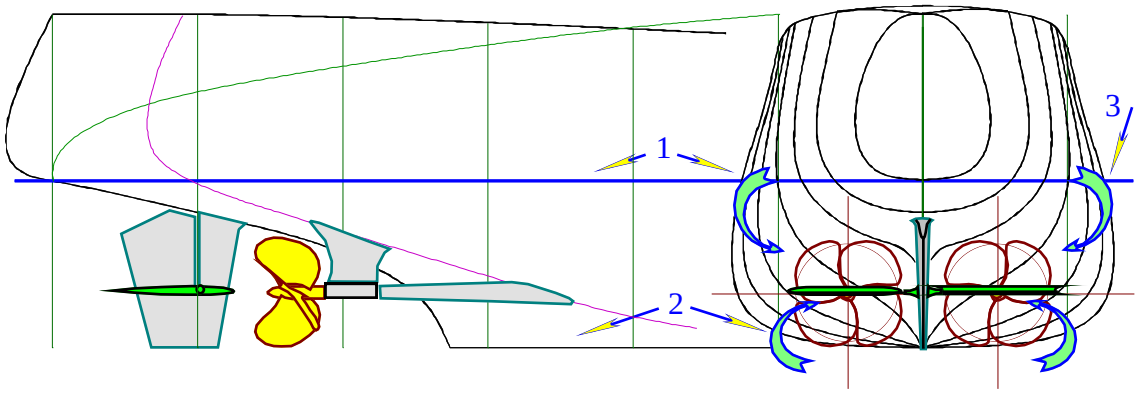


Рис. 44. Кормовая скула, подзор, раковина и ахтерштевень двухвинтового корабля*, оптимизированные по условиям минимизации ходового дифферента, корабельного волнообразования и, как следствие, ожидаемого уменьшения силового воздействия на корабль со стороны штормового волнения за счет пропуска штормовых трохоидальных волн через корпус корабля с минимальными искажениями, и что, в случае остановки гребных винтов, обеспечивает большой размах с вертикальными компонентами скоростей жидкости в гребнях штормовых волн, необходимых для активизации крыльевых успокоителей килевой и бортовой качки в качестве пассивных штормовых крыльевых движителей на упруго проворачивающихся горизонтальных баллерах. Двухвинтовая схема винто-рулевого комплекса позволяет увеличить полноту кормовой оконечности корабля, при этом, за счет разнесения потоков за гребными винтами от диаметральной плоскости корабля, отчасти улучшаются условия работы активных успокоителей качки, в то время режим штормовых движителей с широко разнесенными крыльями будет способствовать некоторому усилению бортовой качки.*

Комплекс перечисленных технических решений в целом способствует лучшей ходкости и малой качке в условиях интенсивного штормового волнения, предотвращает набрызговое обледенение верх-

них палуб и обусловливает возможность автономного плавания во льдах средней тяжести.

В технических решениях выделяются варианты для одновинтовой (рис.43) и двухвальной (рис.44) схем винто-рулевого комплекса и кормовой оконечности для достижения стабилизации корпуса и эффективного хода на крупном штормовом волнении.

На чертежах цифрами отмечены следующие конструктивные особенности судовых обводов в кормовой оконечности корабля:

1. Винтовая поверхность на уровне переменных ватерлиний в зоне корабельного волнообразования и отражения штормовых волн от корпуса корабля.

2. Винтовая поверхность создающая компенсирующий закрученный поток жидкости из под днища корабля под кормовой подзор – в зону винто-рулевого и стабилизирующего крыльевого комплекса.

3. Завал борта на уровне действующей ватерлинии способствует гидродинамической компенсации бортовой качки корабля, а также перехватывает приподнятые гребнем корабельной волны ледовые поля и не допускает их затопление и затягивание в район винто-рулевого комплекса в кормовой части корпуса.

Гидродинамическая стабилизация кормовой части корабля обеспечивает возможность движения на тихой воде без ходового дифферента, что согласуется с требованием минимизации внешнего силового воздействия со стороны штормовых волн, а также существенно уменьшаются надводный объем над кормовой раковиной, что минимизирует внешние силы при штормовании на крупном волнении без хода, и, как следствие, обеспечивает возможность работы аварийных плавниковых движителей.

Инженерно-технические проектные решения.

Корабельное волнообразование, также как и воздействие штормовых волн, относится к полосе бортовой обшивки на уровнях переменных ватерлиний, омываемых под воздействием вертикальной и килевой качки корабля.

В этой полосе ватерлиний создается винтовая поверхность, на протяжении от бортовых булей до кормового подзора, для закручивания и частичного перенаправления потока вблизи бортовой обшивки вверх, что способствует компенсации спутного (*гидростатического*) разрежения и предотвращению отрыва высокочастотной составляющей корабельной волны; с последующей дисперсионной концентрацией волновой энергии в длиннопериодной части спектра с фазовым смещением для гасящей интерференции с главной компонентой волнообразования – поперечной корабельной волной.

Такая винтовая поверхность на уровне переменных ватерлиний формирует малый надводный объем и естественное заострению раковины под крейсерской кормой корабля, что требуется для умерения вертикальной и килевой качки; для предотвращения ударов и опасных захватов кормы корабля (брочинга) гребнями девятых валов на курсах по волне малыми ходами или в случаях аварийной потери хода, а также способствует сохранению слабоискаженного поля штормовых волн под кормовым подзором при остановке главных машин, что автоматически переключает успокоители килевой и бортовой качки в режим штормовых аварийных движителей для удержания корабля на заданном курсе под тягой жестких качающихся крыльев на упруго проворачивающихся горизонтальных балерах.

Заостренная крейсерская корма не искажает гидродинамическое поле потоков воды в штормовых волнах под кормовым подзором корпуса при остановке главных машин, что автоматически переключает активные успокоители килевой и бортовой качки в режим пассивных штормовых аварийных крыльевых движителей для вывода корабля на безопасный штормовой курс, для чего общее устройство и форма кормовой оконечности должны оптимизироваться для поддержания управляемости даже при той минимальной тяге, которая возникает при вертикальных размахах кормовой оконечности в результате упругой реакции баллеров на пассивных крыльевых движителях;

Вторая винтовая поверхность, с осевой линией по килю корабля, служит созданию закрученного подтока из под днища корабля в сторону ахтерштевня. По этой винтовой поверхности происходит встреч-

ное закручивание существенно большего поддерживающего потока, что позволяет обеспечить взаимокомпенсацию нижнего и верхнего, идущего на уровне переменных ватерлиний, завихренных потоков в зоне кормового подзора, в области действия руля и горизонтальных успокоителей остаточной (нелинейной) килевой и бортовой качки корабля. Оба потока создают суммарную компоненту скорости потока жидкости вертикально вверх на малом удалении от бортовой обшивки, чем предотвращается затягивание битого льда из района бортовых булей в зону кормового винто-рулевого и стабилизирующего комплекса, и, как следствие, возникают гидродинамические условия для создания устойчивого ледового канала за кормой корабля.

Вышеперечисленные конструктивные особенности, в едином комплексе инженерно-технических решений, способствуют улучшению ходкости, маневренности и умерению качки в условиях интенсивного штормового волнения, а также обусловливают возможность автономного плавания в режиме ледореза во льдах средней тяжести, при котором длительным упором главных машин разделяются или безударно раскалываются ледовые поля относительно небольшой толщины.

Корабль с плавниковым движителем

Патент № RU 2360831 C2

Корабль, содержащий водонепроницаемый корпус, механизмы управления, а так же энергетическую установку, отличающийся тем, что движителем корабля является машущий плавник из последовательности гибких полосовых поверхностей с жесткими ребрами, выполняющими перемещения в цепной связке, задающей углы наклона жестких ребер по касательной к бегущей синусоиде, что в разные моменты времени образует геометрически сложные седловые поверхности со строго заданными скоростями деформации машущего крыла, при этом, для приведения в движение цепной линии плавника строго по синусоидальному закону, применимы различные механизмы на ос-

нове коленчатого вала, гибкой шарнирной плети или линейных шаговых электродвигателей.

Движитель (рис.45) может быть размещен под кормовым подзором надводного корабля, или в хвостовой части подводной лодки.

При использовании динамически корректируемого движения плавникового движителя, он одновременно может действовать в качестве руля и успокоителя качки.

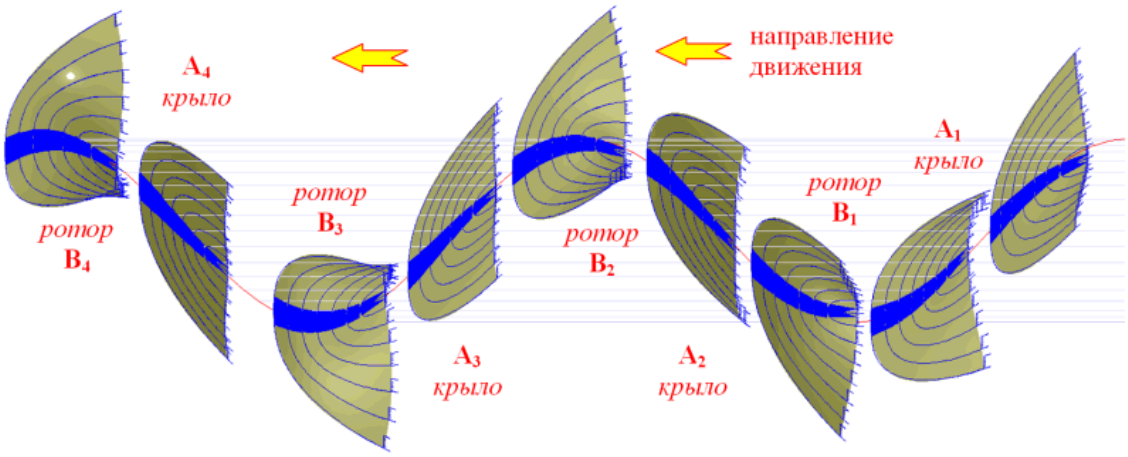


Рис. 45. Кинематическая последовательность *вертикальных перемещений и сопутствующее изменение формы машущей поверхности симметричного гибкого плавникового движителя (справа–налево), при его движении по синусоидальной траектории в диаметральной плоскости за корпусом судна. В позиции: А – плавник работает как крыло, в позиции: В – в режиме ротора.*

В позиции «**А - *крыло***» – максимальная скорость поперечного изгиба плавника соответствует максимальной скорости вертикальных перемещений и оптимальному углу атаки, достигаемых на средней линии синусоиды. При этом плавник полностью распрямляется, создавая максимальную тягу за счет угла атаки плоского крыла, а его концевая кромка максимально быстро изгибается, создавая два вращательных потока, направленных навстречу гидродинамическим спутным вихрям, срывающимся в этот момент с концевой кромки крыла с наибольшей интенсивностью. Таким образом, происходит компенсация индуктивных потерь, характерных для жесткого крыла, которые в случае крыла короткого удлинения значительно ухудшает его качество.

Позиция «**В - *ротор***». В крайних положениях поверхность плавника получает максимальное седловое искривление. Средняя линия плавника ложится на вершину синусоиды, что при поступательном движении в жидкости создает пониженное давление на внешней поверхности крыла. Линия крыла сильно искривлена во внешнюю сторону от ведущей синусоиды, концевые кромки максимально загнуты, и на них действует индуктивный вихрь, зародившийся в момент максимальной скорости махового движения плавника в позиции «А-крыло». Пониженное давление на осевой линии плавника затягивает концевые индуктивные вихри в воде к диаметральной линии крыла. При этом, за счет седловидного изгиба поверхности плавника, вихревое течение снова преобразуется в поступательное, поддерживающее тягу движителя.

При выходе из крайнего положения «***В-ротор***» концевые поверхности крыла быстро распрямляются навстречу остаточным индуктивным вихрям, окончательно останавливают их вращение и отталкивают остатки воды по потоку назад. В этот момент, плавник вновь переходит к основному маховому движению, и крыло начинает распрямляться, а быстрый изгиб концевых поверхностей плавника снова привносит закрученный поток на концах гибкого крыла, которые компенсируют вновь образующиеся индуктивные вихри в момент распрямления поверхности крыла в среднем положении плавника «А-крыло».

Устройство пассивного поступательного перемещения плавника под действием вертикальной качки корпуса корабля, при котором кинематика поверхности плавника будет жестко соответствовать геометрически установленным для него формам на заданных участках траектории, плавник будет работать в качестве движителя, использующего энергию вертикальной качки кормовой оконечности на интенсивном волнении, обеспечивая безопасность штормового маневрирования корабля с остановленными главными двигателями.

Для приведения в движение цепной линии плавникового движителя корабля строго по синусоидальному закону применимы различные механизмы:

1 – в виде коленчатого вала внутри корпуса судна, последовательно выдвигающего забортные штоки, между которыми закрепляются связанные в хребет жесткие ребра плавника;

2 – в виде гибкой шарнирной плети, последовательно и жестко связывающей углы слома ребер в цепной связке на синусоидальной траектории;

3 – в виде продольных тросовых тяг, задающих пространственную ориентацию звеньев хребта с помощью поперечных рычагов, установленных в средней части ребер плавникового движителя.

4 – в виде шаговых электродвигателей, в том числе линейных, управляемых с помощью микропроцессоров, позволяющих задавать более сложные законы движения корабельного плавникового движителя, регулируя размах и локальные углы атаки на локальных поверхностях движителя в зависимости от нагрузки и скорости движения корабля; при этом наклоны плавника или небольшие отклонения от строго синусоидального закона движения позволят использовать плавниковый движитель в качестве рулевого устройства и успокоителя качки одновременно.

Испытание натурной модели корабля с жестким машущим плавником в вертикальных шайбах (*локально-двумерная модель потока жидкости*) показало, что плавниковый движитель обеспечивает требуемую тягу для поддержания высокой скорости хода и повышенную проходимость в сложных и штормовых условиях плавания.

Активный стабилизатор килевой и бортовой качки корабля – штормовой аварийный движитель

Патент № **RU-238 4457-C2**.

Минимизация внешних воздействий, построенная на принципах взаимного снижения восстанавливающих и возмущающих сил и моментов, как это часто и бывает в сложной технике, приводит к усилению негативных воздействий некой другой или второстепенной при-

роды, изначально считавшихся незначительными. Так, стабилизация качки за счет уменьшения моментов инерции площади действующей ватерлинии может привести к излишнему крену под действием ветра или перекладок рулей; к избыточному дифференту при ускорении или реверсировании хода.

Для эффективной компенсации остаточных воздействий должны использоваться активные стабилизаторы бортовой и килевой качки, обладающие достаточной управляющей энергией для компенсации всех изначально неучтенных и условно «незначительных» внешних сил.

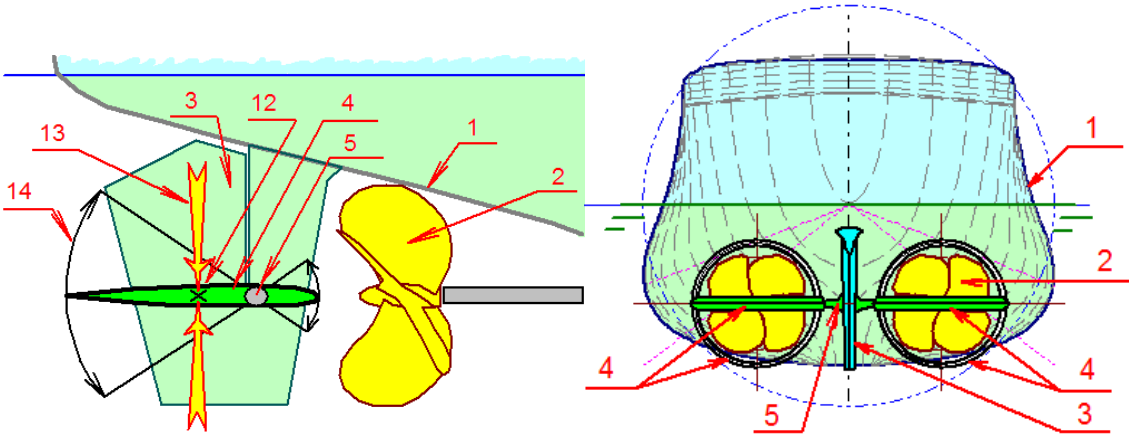


Рис. 46. Винторулевой комплекс *с вертикальным рулем (3) и горизонтальными крыльями активных успокоителей килевой и бортовой качки (4), которые в случае остановки гребных винтов (2) работают в качестве аварийных штормовых движителей. 1 – оптимизированный корпус корабля; 4 – крыло может быть жестко соединено с поворотными насадками; 5 – горизонтальный баллер установлен строго на линии балансирной оси для потока за гребным винтом и допускает упругий поворот на угол порядка ±30°; 12 – центр площади горизонтального крыла, к которому сводится суммарная сила (13) при вертикальных перемещениях кормовой части корабля; 14 – угол пассивного упругого поворота плоскости крыла*

Активный стабилизатор килевой и бортовой качки корабля – штормовой аварийный движитель (рис.46) состоит из двух управляемых крыльев или поворотных насадок на гребных винтах, установленных на горизонтальных или наклонных баллерах в кормовой части корпуса корабля под прямым воздействием потока жидкости от работающих гребных винтов, отличающиеся тем, что:

- поворотные баллеры крыльев допускают упругий люфт не менее чем до углов ±30°, обеспечиваемый пружинным (или электромагнитным) устройством с восстанавливающим моментом пропорциональным отклонению крыла от нейтрального нулевого, или заданного аппаратурой управления угла;

- оси баллеров проходит через гидродинамический центр бокового сопротивления крыльев, что минимизирует усилия на их перекладку на больших скоростях хода корабля;

- при повороте крыльев враздрай, на ходу корабля создаются кренящие моменты для компенсации бортовой качки; при повороте крыльев вместе на всплытие/погружение – создаются дифферентующие моменты для компенсации килевой качки;

- при использовании двух наклонных крыльев, они одновременно будут выполнять функции рулевого устройства с неуправляемым компенсатором центробежного крена на циркуляции, и поддерживать улучшенные условия для безопасного маневрирования на крупном волнении;

- при использовании горизонтальных крыльев совместно с традиционным вертикальным судовым рулем, законы автоматического управления рулем и крыльями становятся независимыми, что позволяет комплексно решать задачи маневрирования и стабилизации корпуса корабля на больших скоростях хода и в условиях штормового волнения;

- в случае остановки гребных винтов на крылья начинают действовать вертикальные потоки жидкости, обусловленные вертикальными перемещения кормовой части корабля в штормовых условиях, при этом крыло упруго поворачивается и создает тяговое усилие для движения корабля вперед, величина которого в гидростатическом приближении многократно превосходит силовое усилие на рычаге между осью баллера и центром площади крыла.

В штормовых условиях стабилизированный по направлению поток жидкости вблизи корпуса корабля, идущего полным ходом вперед, имеется только под кормовым подзором, непосредственно за работающими гребными винтами (рис.46). Именно здесь возможно по-

лучение наибольших сил для активной стабилизации крена и дифферента корабля как в штормовую погоду, так и при быстрой циркуляции на тихой воде.

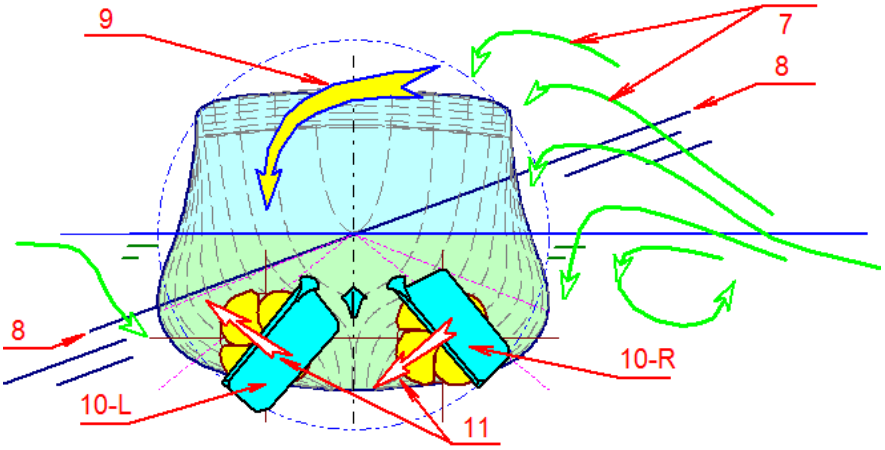


Рис. 47. Силовое воздействие гребней штормовых волн *(7); условно наклонная поверхность штормового моря вблизи корпуса корабля (8), и образующийся под их суммарным воздействием кренящий момент (9). Поворот правого крыла (10-R) на погружение на затопленном волной борту, где образовалась избыточная плавучесть, и левого крыла (10-L) – на всплытие – для компенсации массы-объема оголившегося борта, создают необходимую пару сил для компенсации воздействия внешнего кренящего момента (11).*

В случае потери хода кормовая часть корпуса получает значительные вертикальные колебания под воздействием штормовых волн, что обусловливается полными ватерлиниями и большим надводным объемом корпуса над кормовым подзором, устраиваемым для обеспечения безотрывного потока в зоне действия гребных винтов. Интенсивные вертикальные раскачивания являются необходимым условием для работы крыльевых устройств в качестве машущих плавниковых движителей, которые активизируются в наиболее опасных режимах штормового плавания корабля с остановленными машинами. Пассивный плавниковый движитель не требует дополнительных силовых или управляющих воздействий на крыльевые устройства, а упругий поворот (*люфт*) баллеров на угол до ±30° будет одновременно уберегать корпус от ударных воздействий на корпус со стороны штормовых волн, что не менее важно и в режиме активной стабилизации качки на ходу корабля.

При использовании вертикального пера руля и двух горизонтальных стабилизирующих крыльев (рис.46) математические законы управления обретают свойства достаточности. В частности, это означает, что на тихой воде стабилизаторы качки смогут скомпенсировать крен, возникающий при циркуляции корабля с малой начальной остойчивостью на больших скоростях хода, что также является важным мореходным качеством корабля при его эксплуатации.

Наклонные крылья (рис.47) служат также рулями управления, которые при перекладке одновременно создают кренящий момент на тот же борт, чем компенсируются центробежные силы, возникающие на циркуляции корабля. При работе в качестве успокоителей качки, наклонные крылья одновременно поворачивают судно в сторону волнового воздействия, что соответствует маневру на уменьшение опасности, и, что особенно важно при движении на курсах по волне в условиях возможного брочинга.

Ближайшим прототипом является универсальное по принципу действия и значительно более сложное в реализации крыльевое устройство (*патент* RU-2360831 – «*Корабль с плавниковым движителем*»), где гибкое машущей крыло является главным движителем, успокоителем качки и рулевым устройством одновременно, и которое также способно создавать тягу по излагаемым здесь принципам пассивного штормового аквадвижителя.

Завершенные проекты перспективных кораблей и судов для дальневосточных морей России

Условия мореплавания в северо-западной части Тихого океана, в дальневосточных морях России не позволяют эффективно использовать флот тихой погоды и прибрежного плавания, широко представленного и активно использующегося в зарубежных морских акваториях умеренных широт. Концептуальные целевого положения непротиворечивого проектирования корабля, устанавливающие механику слаженного диалога корабля со штормовым морем, в хорошей мор-

ской практике связываются аксиомой об отсутствии чего бы то ни было лишнего на красивом корабле.

Дальние океанские переходы между районами рыбных промыслов и незащищенными сахалино-курильскими портопунктами изобилуют штормовыми ветрами, с подвижными льдами и нередким обледенением палубных устройств и надстроек в холодные сезоны года. Все классы рыбопромыслового и вспомогательного флота должны проектироваться с учетом фактического отсутствия надежных портов-убежищ на Сахалине и Курильских островах, что требует от экипажей постоянной готовности к выходу из портовых гаваней для неизбежной встречи всех ураганов в открытом море на глубокой воде вдали от берега.

Непредсказуемость рейсовых заданий для каботажных океанских маршрутов востребует создание условий эффективной и безопасной работы палубной команды, использования судовых устройств и механизмов в любых погодных условиях, когда исходные мореходные качества и опыт штормового кораблевождения лишь совместно подтверждают реальное предназначение судна, и – являются единственной гарантией эффективности морских работ и безопасности экипажа.

Повышенные требования относятся к образовательному и плавцензу экипажей судов, их опыту морской практики, на котором только и могут основываться ключевые проектные решения и методы достижения наивысшей эффективности морских промысловых работ, спасательных операций или наблюдений за обстановкой на море в навигационных условиях дальневосточных морей России: с ветрами более 30 м/с; крупными прогрессивными волнами высотой более 10 м и крутизной фронта порядка 30°, с периодом 6–8 с в Охотском и Японском морях, и до 15 с – в Тихом океане; а также регулярным проявлением стоячих девятых валов с крутизной гребня более 45°.

Эффективность всепогодного ведения работ на море связана с комфортностью обитания экипажа по плавности и малости штормовой качки; с уровнем защищенности палубной команды от шквалов и северных леденящих ветров; а также с возможностью обогрева поме-

щений для судовых служб и палубных команд в зимних рыбопромысловых и гидрографических экспедициях. Функциональные цели проектной оптимизации увязываются с навигационными требованиями по ходкости произвольными курсами относительно штормового волнения и ветра; с построением практичных схем распределения масс и объемов судовых отсеков, с удобными выходами на рабочие палубы; и с последующим решением множества инженерных задач по согласованию технологических процессов для ведения морских работ и удовлетворения повседневных бытовых забот экипажа.

В отличие от среднеширотной навигации теплых морей, Дальнему Востоку России требуются узкоспециализированные суда для особых штормовых и ледовых условий плавания, эффективность эксплуатации которых определяется снижением потерь ходового времени на активное штормование или ожидание у моря хорошей погоды. Фактическое отсутствие портов-убежищ определяет главное требование ко всем дальневосточным кораблям и судам: это возможность непрерывного и всепогодного ведения промысловых, спасательных или поисковых операций в открытом море, так как все сахалино-курильские портопункты и рыбацкие порты-ковши дают разрешения на подходы к причалам только в тихую погоду и при отсутствии штормовых предупреждений.

В развитие концептуальных проектных предпосылок к означенным классам кораблей и судов, сообразно условиям эксплуатации можно сформулировать требования к мореходным качествам судов:

– транспортные, спасательные и рыболовные суда обеспечиваются ходкостью любыми курсами относительно штормового волнения и ветра; при обязательной стабилизации качки для сохранности креплений груза и поддержания возможности ведения палубных работ в любых погодных условиях;

– суда гидрографической и патрульной службы должны быть устойчивыми на штормовом курсе, иметь возможность поддерживать ход и активно маневрировать в любых погодных условиях;

– все классы судов должны оптимизироваться по условиям минимума килевой качки и незаливаемости кормовой рабочей палубы на

ходу вперед под главными (маршевыми) двигателями, возможно при избыточной заливаемости, вертикальной качке и рыскании в носовой оконечности корпуса;

– положим также, что безусловная безопасность аварийного штормования без хода может быть лишь частично снижена в угоду главного предназначения корабля, что повышает требования к квалификации экипажа, в борьбе за живучесть судна, с возможностью предпринимать активные действия по установке штормовых парусов и плавучих якорей.

На практике это взаимосвязанные задачи аэрогидромеханики корабля в условиях интенсивного штормового волнения и ветра, с целевым функционалом на достижение: 1 – ходкости; 2 – стабилизации корпуса; 3 – возможности ведения палубных работ без погодных и технологических ограничений. Обобщенные проектные решения сводятся к следующим особенностям формы корпуса и общекорабельной архитектуры:

1. Уменьшение площади, поперечного и продольного моментов инерции в широкой полосе омываемых в шторм ватерлиний, их заострение в оконечностях для уменьшения силового воздействия штормовых волн и сохранения ходкости при сниженной килевой качке.

2. Существенное уменьшение надводных объемов корпуса в оконечностях, завал штевней и борта в средней части корпуса на уровне действующей ватерлинии, что стабилизирует ход в режиме прорезания штормовых волн.

3. Исключение развала бортов и широкой непрерывной верхней палубы, что предотвратит чрезмерную качку с ударами волн по бортам и палубам, создаст условия для активного управления ходом в штормовых условиях, а также снимет остроту проблемы борьбы с обледенением.

Указанные правила не противоречат естественным построениям формы корпуса при оптимизации общеинженерных и навигационных требований к перспективному кораблю повышенной мореходности:

– ходкость на спокойной воде, обусловленная острыми носовыми ватерлиниями с бульбовыми обводами и округлыми шпангоутами в средней части корпуса, вмещающими наибольший объем в минимальную поверхность судовой обшивки;

– исключение отрыва пограничного слоя в районе руля и движителей достигается за счет крейсерской кормы с плавными кормовыми рыбинами на теоретическом чертеже, способствующими малости градиентов и завихренности потока в зоне действия движителей;

– проходимость во льдах в автономном плавании может быть улучшена в режиме разрезания и подламывания ледовых полей снизу, что отчасти решает проблему ледовой защиты движителей.

Рыбопромысловые акватории часто характеризуются малыми глубинами морских банок и шельфовых мелководий, где штормовые опасности усугубляются длинноволновыми колебаниями уровня моря, волнами-убийцами и экстремальными течениями, возникающими в результате трансформации штормовых волн и волн зыби, при их активной интерференции, дисперсионным ростом периодов и стратификацией плотности воды вблизи устьев рек и в зонах подъема донных вод. Столь неблагоприятные гидродинамические процессы наблюдаются в узкостях, в местах якорных стоянок, на рейдах и на подходах к воротам морских портов, где опасность мореплавания не исключается даже при умеренных ветрах и длинноволновых откликах прибрежья на далекие шторма.

Последнее замечание весьма важно, так как невозможно найти обоснованные проектные решения на основе гидродинамического согласования безопасных режимов плавания в штормовых условиях на мелководье. Это означает, что каждый проект существующих или перспективных судов должен проходить комплекс мореходных испытаний в прибойной зоне на мелководье, с последующим представлением результатов в наставлениях судоводителям и в алгоритмах автоматических систем управления для ускоренного вывода судна на глубокую воду.

Суда повышенной штормовой мореходности, способные к маневрированию произвольными штормовыми ходами и курсами при но-

минальной (или минимальной) энерговооруженности, как следствие, освобождаются от чрезмерных расходов на топливо и содержание главных двигателей, что, как минимум, с прибылью покрывает единоразовые расходы целевого проектирования, мореходных испытаний и добротной постройки судов для работы в северных широтах дальневосточных морей.

Различные по назначению проекты морских кораблей повышенной штормовой мореходности представим в виде эскизных прорисовок внешнеархитектурного облика; согласованных теоретических чертежей судовых обводов и компьютерных моделей формы корпуса, допускающих расчеты по теории корабля и численное моделирование корабельного волнообразования и волнового сопротивления.

1. Быстроходный корабль – корвет
(патрульно-гидрографическое судно)

Патент **№ RU-238 4456-C2**[36]..

В качестве примера, все вышеизложенные технические разработки обобщаются в проекте перспективного патрульно-гидрографического корабля, предназначенного для непрерывного всепогодного и комплексного контроля состояния морских акваторий; наблюдения за надводной и подводной обстановкой в открытом море и вблизи побережья Сахалина и Курильских островов, в том числе способный обеспечивать решение поисковых и научно-исследовательских задач, проводить морскую разведку, гидрографическую и гидрометеорологическую поддержку морских коммуникаций; а также, во взаимодействии с береговыми службами решать задачи спасения человеческой жизни на море и информационного обеспечения эффективности и безопасности мореплавания в штормовых и ледовых условиях дальневосточных морей России и северо-западной части Тихого океана.

[36] Проект разработан по заданию и под руководством кап. I ранга Сергея Ивановича Кроленко (Высший военно-морской инженерный институт, г. Санкт-Петербург).

Особенностью проектной концепции является исключение сколь-нибудь чужеродных требований к кораблю. Лишь только необходимость наилучшим образом обеспечивать всепогодное морское дежурство, с быстрыми переходами и непрерывным циклом измерения параметров водной и воздушной среды, с синтезом в реальном времени всей доступной информации для решения задач охраны морских рубежей и поддержания эффективности морских работ в контролируемых океанских районах Дальнего Востока России.



Рис. 48. Модель корабля на берегу Амура в г. Комсомольске-на-Амуре. *Затенения в подводной части показывают скуловые участки, отвечающие за взаимодействие со штормовыми волнами на ходу корабля*

Проектные характеристики формы корпуса:

Длина наибольшая / ватерлинии	L	90 / 88,6 м
Ширина наибольшая / ватерлинии	B	10 / 9 м
Ширина по верхней палубе	B_{Deck}	8 м
Высота борта в средней части корпуса	H	6,5 м
Осадка по основной линии / с бульбом	T	4 / 5 м
Водоизмещение	W	1 920 $м^3$
Площадь смоченной поверхности	S	1050 $м^2$
Коэффициент общей полноты	δ	0.473
Расчетная скорость хода	V	25 узл.

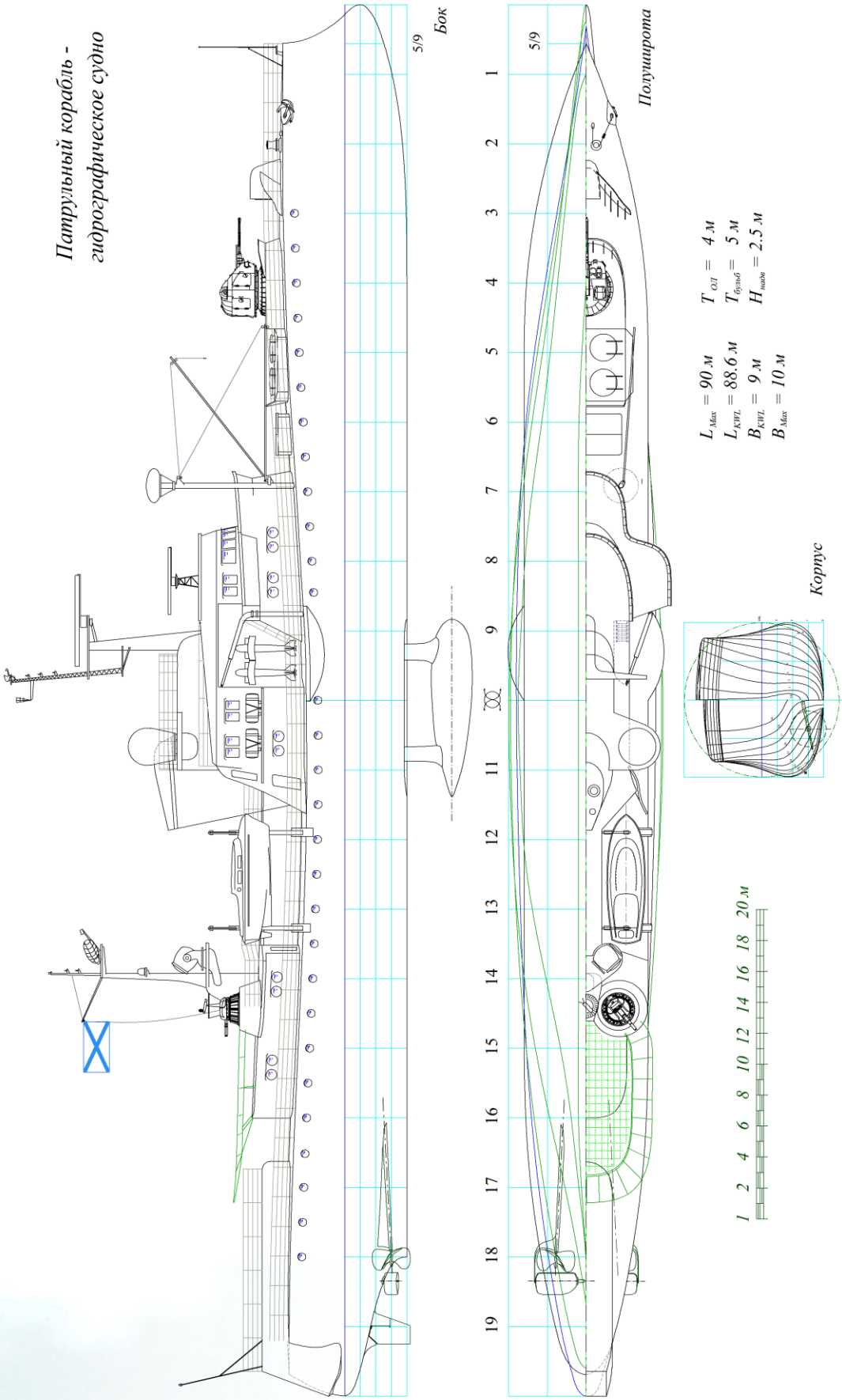


Рис. 49. Проект быстроходного патрульно-гидрографического корабля.

При минимуме вооружений, корабль оснащается научным гидрографическим и гидрометеорологическим оборудованием, предназначенным для комплексного контроля морской обстановки.

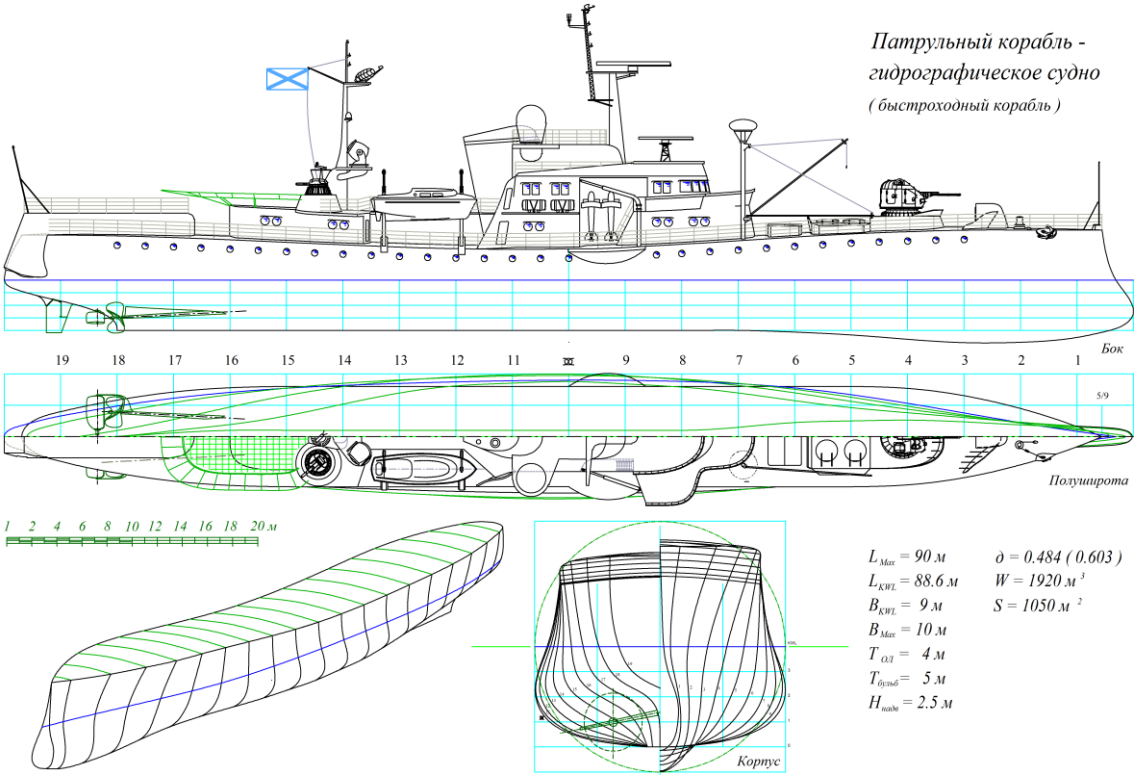


Рис. 50. *Как у средневековых парусников и быстроходных кораблей конца XIX века мидель-шпангоут вписан в окружность. В той же окружности сосредоточены основные палубные рубки, что в целом обеспечит пассивность корпуса по отношению к штормовому волнению.*

Это компромиссный вариант корабля (рис. 50), в котором реализована длинная непрерывная палуба фиксированной ширины, а также обеспечено сильное демпфирование килевой качки за счет развала бортов в оконечностях. Заглубленный бульб предназначен для гидроакустической станции в ущерб мореходным качествам корабля на волнении (*обеспечение мореходности и эффективности гидроакустики возможно только при использовании выдвижных гондол под днищем в средней части корпуса, рис. 49*).

Килевая линия бульба – с «подрезом», чтобы, по крайней мере, он сам находился в стабилизированном потоке, чему также должна способствовать уменьшенная полнота носовых ватерлиний. Ширина и высота палубы бака также выбрана из компромиссных условий для

сохранения традиционных методов работы со швартовными и якорными устройствами.

Для достижения хорошей мореходности в обводы и внешнюю архитектуру корабля вносятся следующие проектные особенности:

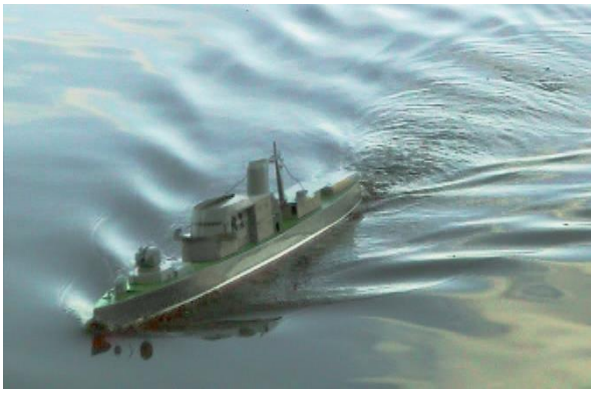


***Рис. 51. Характер корабельного волнообразования**. Носовая расходящаяся волна свободно отрывается, не затягиваясь под скулу корпуса с развитым носовым бульбом.*

- корпус корабля вместе с палубными надстройками на проекции корпус теоретического чертежа замыкается окружностью, что важно для общей стабилизации корабля при ходе произвольным курсом относительно интенсивного волнения и зыби;

- внутренний завал борта в средней части корпуса достигает максимальной величины на уровне действующей ватерлинии;

- оконечности корпуса заостряются со смещением дополнительных подводных объемов в носовую, а надводных – в кормовую часть корабля;

- крейсерская корма имеет кормовой подзор, обеспечивающий стабилизацию потока в районе винто-рулевого комплекса;

- ограниченный по площади плавник ахтерштевня позволяет скатываться (рыскать) с попутной волны, не допуская жестких ударов волн в районе кормовой раковины;

- килевая линия к носу поднимается, образуя «подрез», что уменьшает рыскание в условиях интенсивной бортовой качки;

- аппарель и ангар кормового буксируемого аппарата вносят минимальные искажения в заостренную форму кормовой оконечности корабля;

- основная парусность палубных надстроек и рангоута сосредоточена в средней части корпуса, ширина надстроек нигде не доходит до внешнего борта, чтобы не нарушать общую форму корпуса в виде

кругового цилиндра с продольной осью на уровне действующей ватерлинии.

- непрерывная площадь верхней палубы минимизирована продольным расположением надстроек и фундаментов палубных устройств и механизмов.

В качестве главных требований к форме корпуса быстроходного корабля определяется возможность эффективного поддержания хода произвольным курсом относительно интенсивного морского волнения, при условии максимальной стабилизации корпуса как платформы для всех видов вооружений и систем контроля обстановки на море.

На особенностях формирования внешней архитектуры корабля сказываются обязательная установка ангара для кормового буксируемого подводного аппарата, бортовых океанологических (гидроакустических) параванов, которые позволяют создавать разнесенное антенное поле для гидроакустических или магнитных наблюдений за процессами в водной среде.

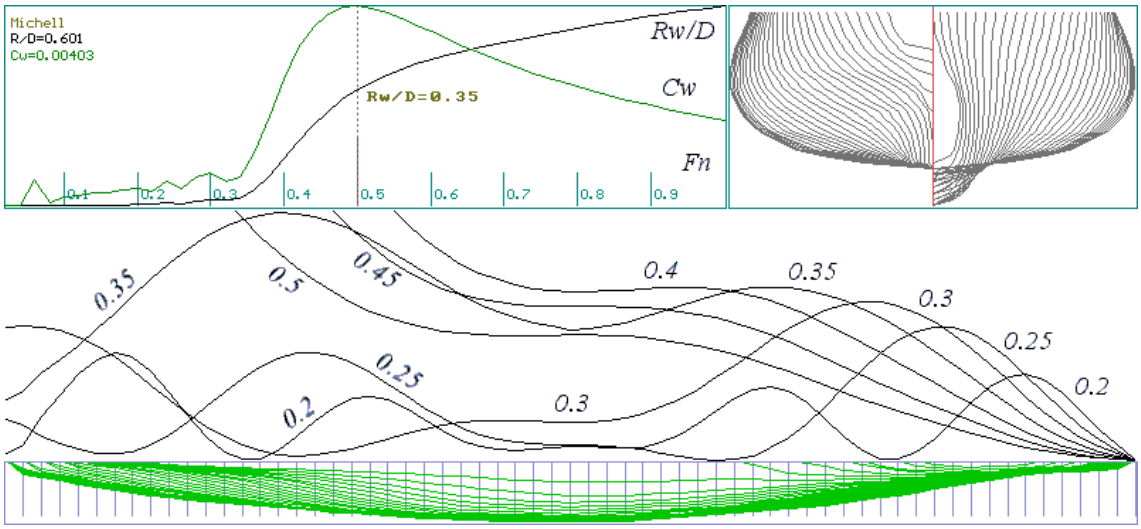


***Рис. 52. Расчет волнового сопротивления и корабельного волнообразования**. В левом верхнем углу приведены графики коэффициента волнового сопротивления (Cx) и удельного волнового сопротивления (Rx/D). В нижней части рисунка показано распределение суммарных интенсивностей корабельного волнообразования вдоль корпуса, построенных для скоростей хода Fn = 0.5; 0.45; 0.4; 0.35; 0.3; 0.25; 0.2 и характеризующих геометрические особенности интерференции волны на уровне ватерлинии.*

Форма ахтерштевня и кормового подзора обеспечивают прижатие кормы к среднему уровню моря на ходу корабля, что создает условия для захвата кормы попутной волной. При развитом бульбе это может приводить к излишнему рысканию и бортовой качке. Чтобы сбалансировать негативные воздействия, площадь плавникового ахтерштевня уменьшена для раскрепощения поперечных смещений кормового подзора и уклонения от ударов штормовых волн в раковину.

Основная плавучесть корпуса собрана в его средней части, оконечности же обладают довольно большими запасами надводных объемов, которые должны способствовать демпфированию килевой качки. Центр динамического бокового сопротивления смещен далеко в нос, и на высокой скорости хода бульбовый нос будет жестко удерживать корабль на курсе, что значительно ухудшит управляемость, особенно в штормовых условиях. Предполагается также, что килевая качка будет ослаблена или хотя бы оптимально сбалансирована с вертикальной.

Кривые элементов теоретического чертежа (рис. 39) в полной мере характеризуют гидростатические особенности формы корпуса, а также позволяют сделать оценки гидродинамических воздействий на корпус корабля, находящегося в свободном плавании на взволнованной поверхности моря.

Из анализа кривых элементов теоретического чертежа можно сделать следующие выводы о мореходных качествах нового корабля:

- минимум аппликаты метацентра (***zM***) приходится строго на конструктивную осадку корабля, что позволяет безопасно удерживать метацентрическую высоту близкой к нулю, что в свою очередь позволяет пассивными методами снизить качку на интенсивном морском волнении, а также создает условия для эффективной работы активных успокоителей бортовой качки;

- несмотря на то, что при увеличении осадки (***Z***) площадь действующей ватерлинии (***Swl***) также растет, но все же продольный момент инерции площади этой ватерлинии (***Jx***) уменьшается, что подтверждает качество формы корпуса по снижению силового взаимо-

действия с гребнями крупных морских волн, отражающихся на бортовой качке;

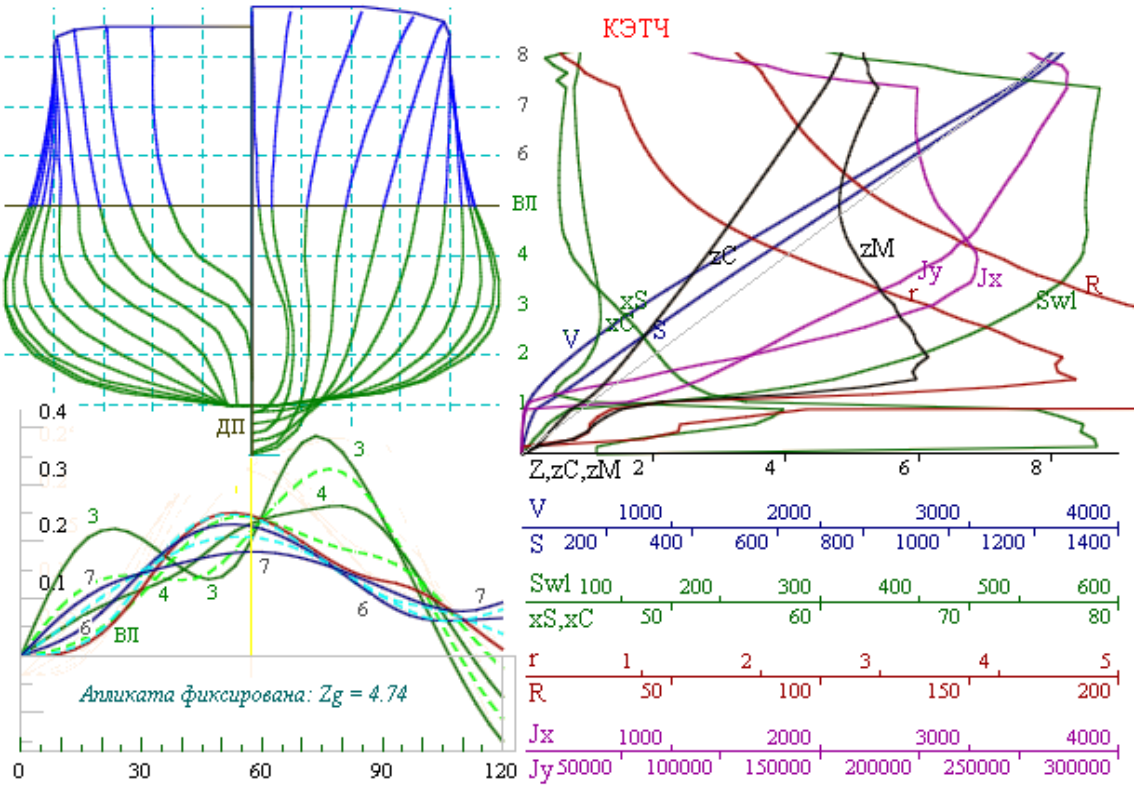


Рис. 53. Диаграммы плеч остойчивости *(слева) для различных осадок, отмеченных на проекции корпус теоретического чертежа (слева вверху). Расчет остойчивости выполнен для Zg=Zm на конструктивной осадке (ВЛ). При всех изменениях осадки колрпус приобретает положительную начальную остойчивость.* ***Кривые элементов теоретического чертежа*** *(справа)****.*** *Здесь и далее на графиках приведены zC, zM – аппликаты центра величины и метацентра; V – грузовой размер; S – площадь смоченной поверхности корпуса; Swl – площадь действующей ватерлинии; xS, xC – абсциссы центра величины и площади ватерлинии; Jx, Jy – продольный и поперечный моменты инерции площади ватерлинии; R, r – продольный и поперечный метацентрические радиусы.*

- поперечный момент инерции площади действующей ватерлинии (***Jy***) растет при увеличении осадки, что обусловлено устройством широкой верхней палубы, не сужающейся к оконечностям. Это приведет к некоторому улучшению всхожести на волну и незаливаемости верхних палуб, однако – за счет ухудшения условий взаимодействия корпуса с океанской зыбью на ходу корабля;

- довольно хорошо выдерживается вертикаль абсцисс центров величины (***xC***) и площади действующей ватерлинии (***xS***) во всем диапазоне рабочих осадок, и в том числе обусловленных вертикальной качкой на волнении, что должно создать условия для успокоения рыскания на курсе, из-за которого корабль может неоправданно терять ход даже на умеренном волнении.

При построении диаграмм остойчивости центр масс зафиксирован в метацентре на конструктивной осадке, что соответствует нулевой начальной остойчивости. Корабль всегда приобретает положительную остойчивость на других осадках, образующихся при всплытии/погружении корпуса на вертикальной качке. Анализ остойчивости позволяет оценить особенности гидростатики корпуса, а также характер его взаимодействия с волнением при бортовой качке:

1. При конструктивной осадке, соответствующей максимальному завалу бортов в средней части корпуса, диаграмма остойчивости приобретает ярко-выраженную S-образную форму, что необходимо для безопасного снижения начальной остойчивости и увеличения собственных периодов бортовой качки корабля, при которых активные стабилизаторы крена смогут работать с максимальной эффективностью;

2. Максимальные плечи статической остойчивости расположены вблизи угла 90°, что свойственно плавающим телам цилиндрической формы, у которых моменты инерции площади действующей ватерлинии не изменяются даже при больших углах крена. Углы заката диаграмм остойчивости превышают 100° (*при нулевой начальной остойчивости*), что свидетельствует о достижении нейтральности или гидродинамической пассивности корпуса в условиях морского волнения с интенсивной бортовой и вертикальной качкой.

3. При минимуме внешних силовых воздействий на корабле с высокой эффективностью могут быть использованы активные успокоители килевой и бортовой качки. Установка успокоителей предусматривается под кормовым подзором в зоне активного действия ускоренных гребными винтами потоков воды, где постоянство направления

обеспечивает устойчивость и надежность отработки команд стабилизации корпуса как по бортовой, так и по килевой качке. В случае остановки главных машин, такие успокоители качки автоматически войдут в режим аварийных штормовых движителей, тяга которых должна быть достаточной для удержания корабля на безопасном штормовом курсе. Эффективных скуловых килевой не очевидна. Следует предусмотреть возможность продольной перекачки балласта для частичного изменения инерционных характеристик корпуса, что в условиях штормового волнения расширит возможности активной стабилизации килевой качки; оптимального штормового курса и скорости. Остаются открытыми вопросы о возможности возникновения ходового дифферента или потери остойчивости на больших скоростях хода, а также неопределенность гидродинамического влияния носового бульба в условиях плавания на крупном морском волнении.



***Рис. 54. Эксперименты в опытовом бассейне** (слева) **и на озере Тунайча** (справа) с самоходной моделью быстроходного корабля. Округлый корпус не разрушает гребни крупных волн, что позволяет поддерживать высокую скорость хода. Испытания на регулярном волнении показали практически полную гидродинамическую компенсацию бортовой качки на крупном волнении.*

Рассматриваемый здесь перспективный корабль имеет исторические прототипы, отменные мореходные качества которых были подтверждены хорошей, но уже исторической морской практикой. Это корабли класса эсминцев и крейсеров конца XIX – начала XX веков.

Отмеченные недостатки, которые могут проявиться у нового быстроходного корабля, отсутствуют у исторического крейсера «Аврора», который сочетает практически все гидродинамические досто-

инства рассматриваемых в этой книге кораблей и судов повышенной штормовой мореходности.

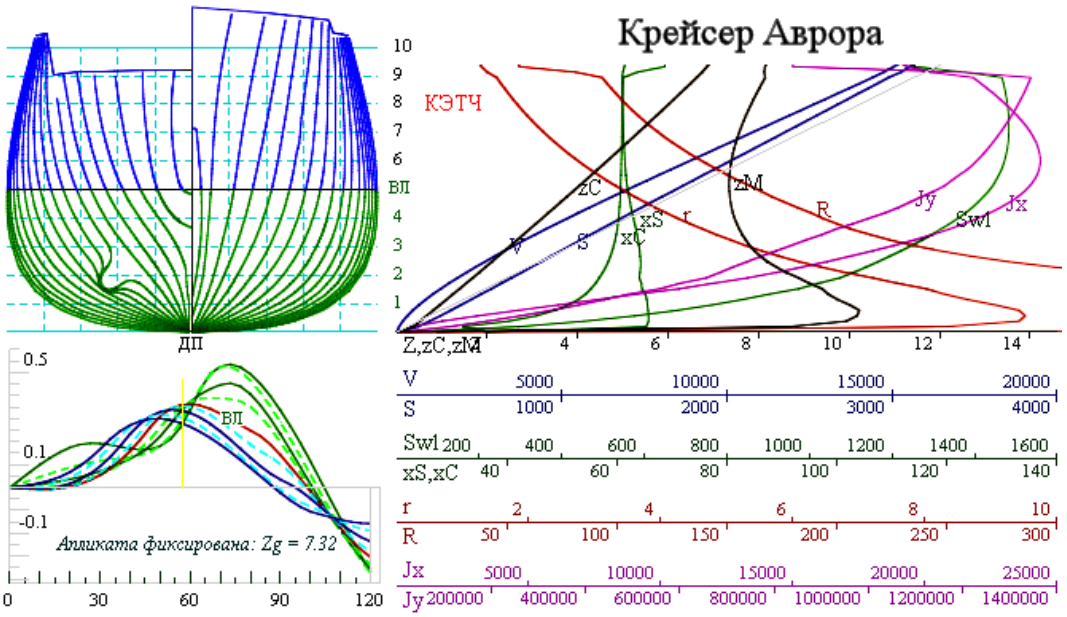


***Рис. 55. Кривые элементов теоретического чертежа и диаграммы остойчивости формы корпуса крейсера «Аврора»**. Плавные и симметричные обводы корпуса, сбалансированность архитектуры его палубных надстроек и корабельных механизмов так же, как и идеальные расчетные гидродинамические характеристики крейсера вновь подтверждают его «революционность» в отношение к современному кораблестроению*

Однако крейсер «Аврора», как и поздние парусники, не обладает возможностью безопасного штормования без хода. Хотя, при возникновении необходимости такого пассивного плавания, для выхода на курс носом на волну крейсер «Аврора» может использовать штормовой парус на гафеле грот-мачты.

2. Универсальное транспортное судно

Патент № **RU-260 3709-C1**.

Самой первой практической трансформацией оригинальных обводов модели МИДВ стал проект универсального многоцелевого транспортного судна, созданный непосредственно в процессе анализа результатов сравнительных мореходных испытаний в опытовом бассейне кафедры теории корабля Ленинградского кораблестроительного института.

Заданием целевого проектирования определяется требование безусловного сохранения ходкости в любых погодных условиях, при этом на интенсивном штормовом волнении судно должно испытывать минимальные вертикально-поступательные ускорения в оконечностях, плавность и умеренность качки в целом не должна приводить к опасности смещения тяжелых и относительно слабо закрепленных грузов в трюмах или на верхней палубе многоцелевого транспортного судна.

Гипотетический проект не отмечается явными противоречиями согласования общеархитектурных решений и эксплуатационных режимов, востребущих различные варианты грузообработки (рис.56), как: вертикальная автономная или портовая погрузка контейнеров и генеральных грузов через палубные люки; горизонтальная погрузка накатных грузов, автомобилей и железнодорожных вагонов через кормовой слип; а также прием на борт пассажиров, размещаемых в каютах носового отсека или в кормовой надстройке.

Проектные характеристики формы корпуса:

Длина наибольшая / ватерлинии	L	171 / 160 м;
Ширина наибольшая /ватерлинии	B	26 / 20 м;
Ширина по верхней палубе	B_{Deck}	20.5 м;
Осадка	T	11 м;
Водоизмещение	W	25 168 $м^3$;
Площадь смоченной поверхности	S	5 343 $м^2$;
Коэффициент общей полноты	δ	0.716.

Ближайшим историческим прототипом транспортного судна выбрана древняя галера с носовым тараном и нависающим над водой ютом и кормовым подзором.

Ассиметричные относительно мидель-шпангоута обводы исторической галеры служили стабилизации качки в носовой части корпуса и способствовали поддержанию штормового хода на веслах и под парусами, а также допускают штормование на курсе носом на волну при минимальной тяге с помощью юления кормовыми веслами.

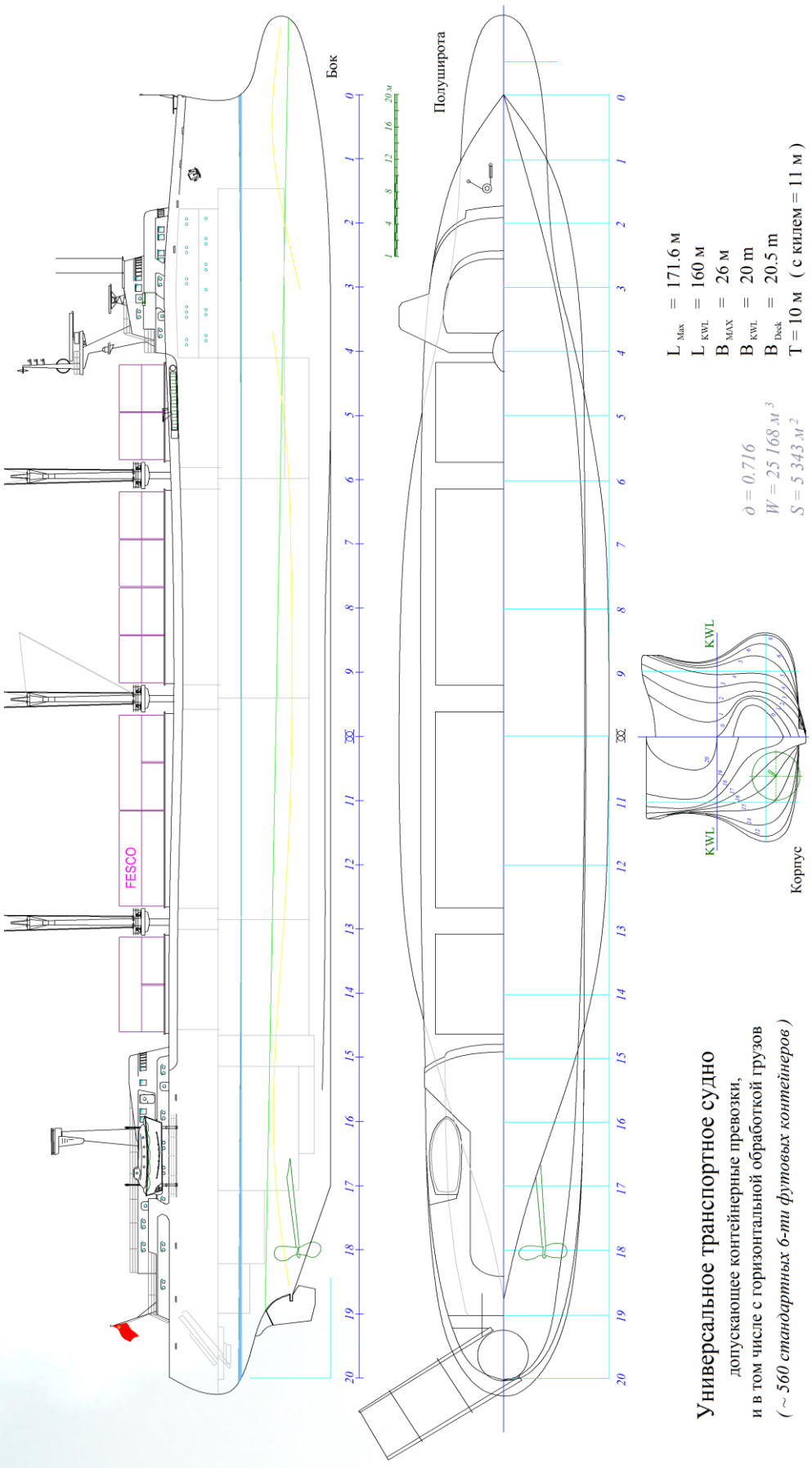


Рис. 55. Эскизная прорисовка формы корпуса и общего расположения универсального транспортного судна, принимающее до 560 стандартных 20-футовых контейнеров, и допускающее горизонтальную обработку грузов.

Подобная пассивная штормовая стабилизация корпуса представляется важным достоинством тяжелого транспортного судна (рис.55), обычно не обладающего избыточной мощностью двигателей, и не имеющего достаточной прочности корпуса для активного противостояния штормовой стихии.



***Рис. 56. При встрече с крупной штормовой волной**, тяжелый носовой бульб разрушает монолитность фронта, перенося точку приложения сил всплытия ближе к средней части корпуса*

Следующие элементы свидетельствуют о компромиссных конструктивных решениях, включенных в проект оптимизированного универсального грузового судна:

- сохранена широкая верхняя палуба, на которой располагается полный комплекс грузовых устройств для проведения автономных погрузо-разгрузочных операций;

- широкая и полная корма, в которой расположена аппарель для горизонтальной обработки грузов, приема большегрузных автомобилей и железнодорожных вагонов;

- рабочий объем корпуса приспособлен для загрузки максимального количества стандартных контейнеров, при этом судовые запасы и внутрикорпусные механизмы разнесены по отсекам с сильно искривленными бортовыми поверхностями.

Выдвинутый вперед и тяжелозагруженный бульб позволит существенно увеличить поперечный момент инерции массы корпуса, что при малом поперечном моменте инерции площади действующей ватерлинии обеспечит снижение интенсивности и увеличение периода

килевой качки, благоприятно скажется на снижении ускорений в оконечностях.

Борт судна заваливается в средней части корпуса на уровне действующей ватерлинии для уменьшения силового воздействия штормовых волн, а для восстановления рабочей ширины палубы шпангоутным контурам в надводной части корпуса придается обратная кривизна (вогнутость). Это обеспечивает возможность эксплуатации судна с метацентрической высотой близкой к нулю, отчего значительно возрастает собственный период бортовой качки, что крайне важно во избежание как резонансного, так и вынужденного силового воздействия штормовых волн, всегда имеющих меньшие видимые периоды даже в открытом океане.

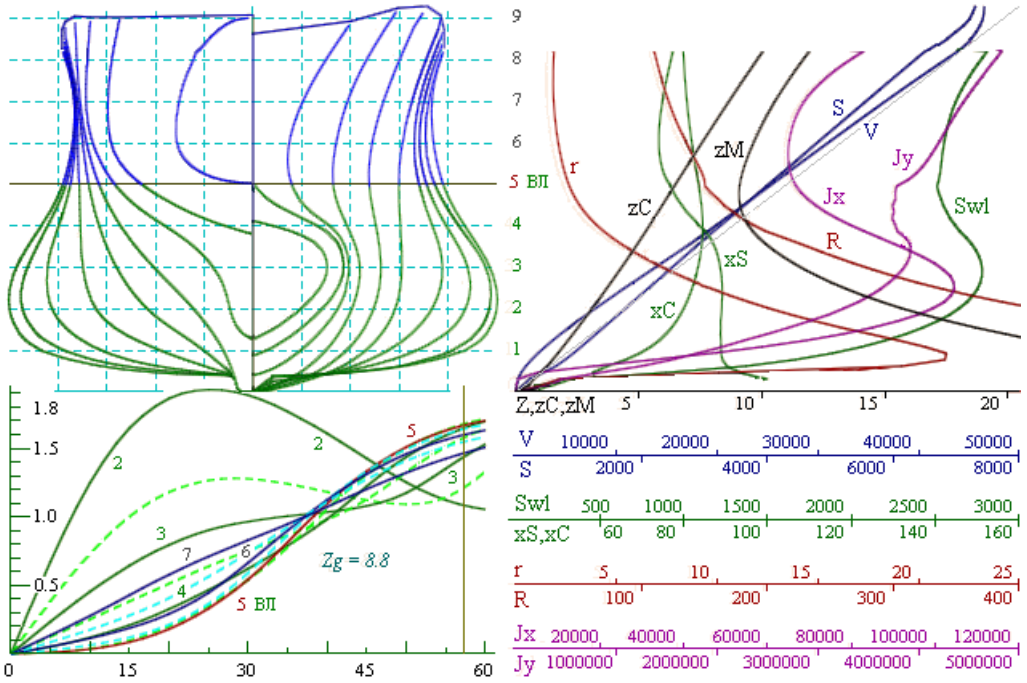


Рис. 57. Кривые элементов теоретического чертежа для корпуса универсального транспортного судна *(справа). Минимальные значения аппликаты метацентра, площади и моментов инерции ватерлинии приходятся на уровень грузовой ватерлинии.* ***Плечи остойчивости формы корпуса*** *(слева внизу) при Zg=Zм на конструктивной осадке. При нулевой начальной остойчивости судно имеет значительные восстанавливающие моменты на больших углах крена и при любых изменениях осадки, чему способствует вогнутость борта на уровне действующей ватерлинии.*

Гидростатические расчеты по теоретическому чертежу (рис.57, *слева вверху*) показывают наличие минимумов аппликаты метацентра, площади и моментов инерции ватерлиний на уровне конструктивной осадки (*справа*). Формально это соответствует первому приближению в направлении снижения внешнего силового воздействия штормовых волн на корпус судна, проявляющегося при «гидростатических» наклонах взволнованной поверхности моря.

Кривые плеч статической остойчивости (рис.57*, слева внизу*) построены для ватерлиний от № 2 до № 7 при фиксированной аппликате центра масс, приведенной к метацентру: Zg = Zм на конструктивной осадке WL № 5. При нулевой начальной остойчивости судно обладает восстанавливающим плечом более полутора метров на углах крена более 60°, а при любых изменениях осадки, как на всплытие, так и на погружение, корпус дополнительно обретает положительную начальную остойчивость, оберегая тем самым судно от непредсказуемо избыточного крена при параметрическом резонансе в условиях усиления вертикальной качки. Состояние абсолютной остойчивости достигается за счет завала бортов и вогнутости шпангоутных контуров в средней части корпуса на уровне действующей ватерлинии.

В мореходных испытаниях опытовой модели транспортного судна использована двухвинтовая схема маршевых движителей (рис.56), что несколько упрощает эвристическое построения формы кормового подзора и раковины. Уточняющая отработка формы консольного нависания кормового подзора для стабилизации потока вблизи одного гребного винта в условиях интенсивного штормового волнения и сопутствующей килевой качки, как следствие, лишь только усилит концепцию построения обводов со смещением надводного объема корпуса в корму, а подводного – в нос (рис.57, *кривая* – x_C).

Штормовое укрытие гребного винта под кормовым подзором, в отличие от простой двухвальной схемы движителей, приведет к уменьшению подводного объема в кормовой части корпуса, и возникновению проектных сложностей с размещением машинно-котельного и дизель-электро-генераторного отделений. Как вариант можно воспользоваться развитыми бульбовыми обводами в носовой части кор-

пуса, где не особо удобно перемещать вдоль корпуса и крепить по штормовому генеральные грузы, и где вместо этого можно разместить наиболее громоздкие машины и электрогенераторы, что одновременно снизит опасность штормового срыва оставшихся тяжелых грузов в носовой оконечности. Жилые помещения экипажа вблизи главных механизмов, и ходовая рубка в носовой настройке, также помогут экипажу своевременно почувствовать и оценить сохранность крепления грузов при назначении скорости хода и выборе безопасного курса в условиях штормового волнения моря.

Выбор мощности главных двигателей и назначение скорости хода в спокойном море может быть выполнено по экономическим расчетам судовладельца. Важно лишь отметить, что универсальное судно с сильным завалом борта и развитым носовым бульбом способно уверенно поддерживать штормовой ход при минимальной мощности главных машин, обеспечивая, тем самым, минимум затрат топлива.

Таблица 4. Оценка состава и характера нагрузки универсального транспортного судна

Статьи нагрузки		Масса [т]	z_g [м]	x_g [м]
Корпус	27%	5 943	10	90
Судовые системы	1,5 %	388	6	80
Энергетическая установка	5%	1 292	3	25
Электрооборудование	2 %	517	4	30
Запас водоизмещения	1,5%	258	4	130
Жидкие грузы	1%	258	4	130
Снабжение и команда	2 %	517	8	130
Груз	50 %	14 341	9	90
Топливо, вода и масло	12 %	3 101	3	90
Полная масса		25 840	9	90

Главным достоинством судов с большой осадкой, при $B / T \approx 2$, является возможность гидродинамической компенсации силового воздействия штормовых волн, что отчасти обеспечивается низким положением центра масс и метацентра, не поднимающихся в полном грузу выше конструктивной ватерлинии $z_g \approx 10$ м (рис.57). В случае уменьшения водоизмещения, например при расходовании топлива и

запасов, или при частичной разгрузке судна, аппликата метацентра быстро поднимается за счет расширения заваленного борта судна, обеспечивая эксплуатационную согласованность в различных грузовых схемах.

Удифферентовка и контроль остойчивости грузового судна зависит от схемы загрузки, за формирование которой отвечает судоводитель при составлении конкретного грузового плана на рейс. Малые продольные и поперечные моменты инерции площади действующей ватерлинии, особенно на уровне конструктивной осадки, требуют выверенной центровки судна с предварительным планированием последовательности грузовых операций в портах назначения, и особо в промежуточных пунктах частичной грузообработки. По диаграмме остойчивости (рис.57-слева внизу) следует обратить внимание, что даже при нулевой начальной остойчивости, судно обладает положительным запасом остойчивости на случай непредвиденных накренений до углов погружения палубы (более 45°), что служит действенным предупреждением об ошибках в проведении грузовых операций

Площадь действующей ватерлинии в кормовой части завышена за счет относительно полной раковины, что необходимо для исключения опасных дифферентов при проведении накатных грузовых операций с помощью кормовой грузовой аппарели (*если в других вариантах проекта универсального грузового судна такая аппарель исключается, то для достижения плавности штормовой качки заостренная крейсерская корма может иметь значительно меньшую полноту*).

3. Океанский спасатель, научно-исследовательское судно

Патент № RU-260 3818-C1.

Небольшие океанские суда вспомогательного флота используются по различному назначению, в том числе в экстремально сложных условиях плавания. Это могут быть спасательные операции, буксировки аварийных судов в штормовых условиях, срочная доставка небольших грузов и почты в морские экспедиции, а также проведение различных морских исследований, поисковых работ и других длительных океанских рейсов и специальных морских операций.

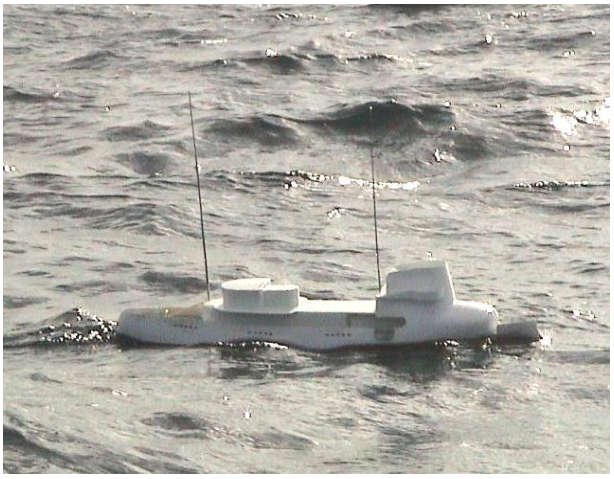


***Рис. 58. Округлый корпус** и низкие палубы судна уменьшают интенсивность всех видов штормовой качки на глубокой воде*

В проектных требованиях к океанскому спасателю (научно-исследовательскому судну) комфортность обитания экипажа, также как и проблемы крепления инородных тяжелых грузов становятся второстепенными. Все предметы судового снабжения и морского снаряжения спасательного судна имеют специальные стационарные крепления по штормовому. Экипаж такого судна составляют моряки-профессионалы, обязанные работать на верхних палубах и выполнять спасательные операции или гидрографические измерения в штормовую погоду и в условиях обледенения, при этом судно должно уверенно маневрировать произвольными ходами и курсами относительно штормового волнения и ураганного ветра, позволяя палубной команде вести работы с использованием специальных механизмов и забортных устройств.

Проектные характеристики формы корпуса:

Длина наибольшая	L	62.8 м;
Длина по ватерлинии	L_{KWL}	60 м;
Ширина наибольшая	B	10.3 м;
Ширина по ватерлинии	B_{KWL}	10 м;
Ширина по верхней палубе	B_{Deck}	8.66 м;
Осадка носом/кормой	$T_{H/K}$	4 / 6 м;
Водоизмещение	W	1 740 м^3;
Площадь смоченной поверхности	**S**	**809 м^2;**
Коэффициент общей полноты	**δ**	**0.58.**

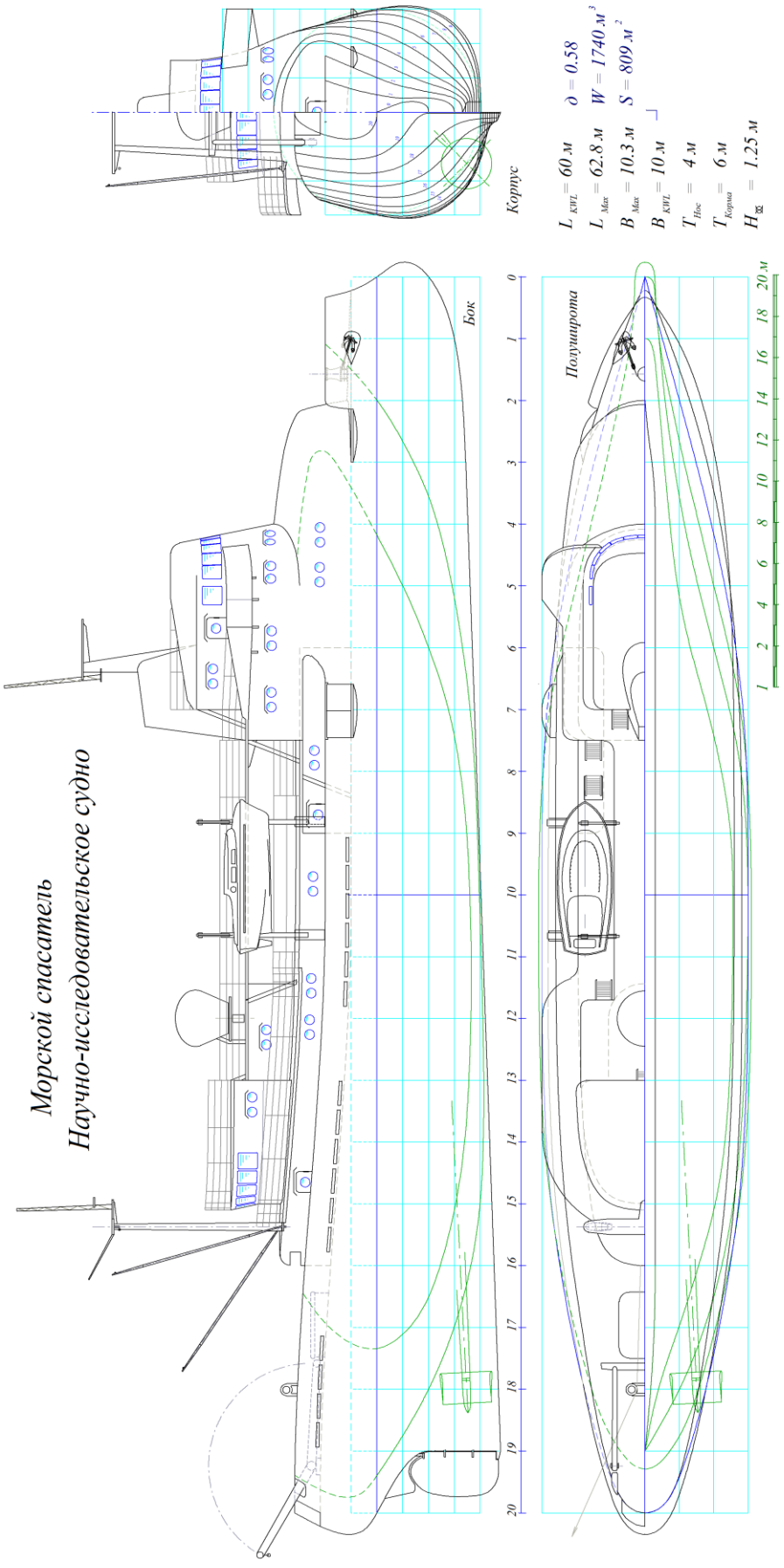


Рис. 59. Форма корпуса и концептуальная схема общего расположения морского спасателя – научно-исследовательского судна, способного к активному позиционированию в условиях интенсивного волнения и ураганного ветра

В концепции построения обводов выбрана ориентация на способности водоплавающих птиц, уверенно удерживающих свое тело горизонтально даже при встрече с крупными гребнями обрушающихся волн. Прототипом представляются исторические корабли эпохи великих географических открытий, например с обводами арабской шебеки. Компоновка палубных надстроек и судовых устройств соответствует следующими проектно-техническими решениями:

1) корпус с надстройками в целом делается подобным круговому цилиндру, что необходимо для минимизации размаха бортовой качки и удержания параллельности палубы в такте качающейся поверхности волн, что важно при спасательных операциях в штормовом море;

2) основной объем и центр величины корпуса смещены в кормовую часть, что способствует смещению в корму центров килевой качки и рыскания, приближая их к зоне действия руля и движителей;

3) полная корма с высоким ютом и глубоко погруженным плавниковым ахтерштевнем обеспечивают управляемость судна в штормовых условиях, позволяя экипажу проводить палубные работы в кормовой части корпуса;

4) зауженные и заостренные носовые ватерлинии не обеспечивают всхожести на волну, отчего центр всплытия и ось килевой качки на ходу судна также смещаются в корму, ближе к средней части корпуса;

5) основная масса судна сосредотачивается в средней части корпуса, что уменьшает поперечный момент инерции массы судна и позволяет использовать горизонтальные поворотные насадки на движителях для успокоения килевой качки и выравнивания дифферента при позиционировании на волнении;

6) центр парусности надстройки смещен в носовую часть корпуса, что приводит его на одну вертикаль с динамическим центром бокового сопротивления при ветровом дрейфе;

7) форма надводного объема носовой части корпуса приспособлена к прорезанию гребней штормовых волн в условиях повышенной заливаемости, для чего палуба бака максимально снижена, а носовая надстройка включена в объем прочного водонепроницаемого корпуса.

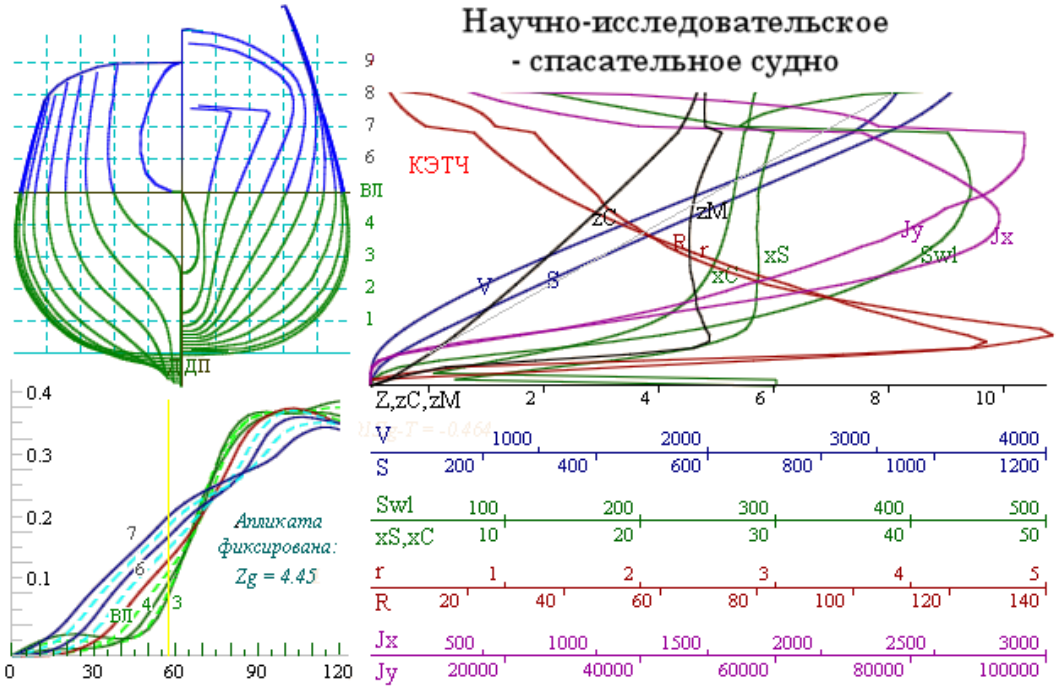


Рис. 60. Кривые элементов теоретического чертежа *(справа) научно-исследовательского судна – морского спасателя, оптимизированного для активного хода и маневрирования в штормовых условиях.* ***Плечи восстанавливающих моментов*** *построены при Zg=4,5, что обнуляет метацентрическую высоту на конструктивной осадке (слева внизу). Даже при таких условиях судно обладает абсолютной остойчивостью на всех углах крена*

Небольшой корабль может обладать изрядно мощным двигателем для активного противостояния штормовой стихии и, соответственно, для выполнения поставленной задачи в режиме активного поддержания высокой скорости хода и требуемой динамики корпуса в условиях интенсивного волнения и ураганных ветров. Активная стабилизация качки, а также динамическое влияние на посадку, крен и дифферент судна с использованием плавниковых успокоителей и автоматически управляемых рулей и движителей принципиально возможны при условии, что форма корпуса и архитектура надстроек обеспечат снижение интенсивности взаимодействия корпуса с морским волнением.

Корпус округлой формы имеет диаграммы плеч остойчивости формы без угла заката и со смещенным центром площади *(максимальным восстанавливающим моментом)* за пределами 90°. На реальных углах крена не возникает больших восстанавливающих моментов, соответственно не возникает и опасных кренящих моментов

при волновых наклонах поверхности моря, что позволяет стабилизировать качку судна с помощью активных успокоителей качки (например: *горизонтальных поворотных насадок, позволяющих управлять как креном, так и дифферентом судна одновременно*).

Фактически это означает, что следование концепции непротивления штормовой стихии является универсальным правилом проектирования кораблей и судов, обеспеченных как пассивными качествами безопасного плавания, так и активными средствами для решения поставленных задач в штормовых условиях.

Корпус типа арабской шебеки не отличается особой ходкостью на спокойной воде, однако это судно способно активно держать штормовой ход произвольным курсом, и не нуждается в укрытии от волн или в уклонении от выбранного маршрута в угоду прихотям штормовой непогоды. Относительно небольшой корабль может противостоять ударным нагрузкам при встрече с гребнями девятых валов, и вполне способен к поддержанию уверенного маневрирования в условиях интенсивного волнения под ураганными ветрами.



***Рис. 61. По характеру корабельного волнообразования** корпус модели может быть признан вполне оптимальным*

Улучшенные штормовые мореходные качества позволят использовать судно в роли морского спасателя, способного приближаться на минимальное расстояние или швартоваться к другому аварийному судну в условиях интенсивного волнения и ветра. Для выполнения указанных задач в проекте судна реализованы следующие архитектурно-технические решения:

1. Если корпус будет обладать достаточными качествами по пассивной стабилизации на волнении, то для полного успокоения всех видов качки и рыскания возможно использование специальных поворотных насадок на гребных винтах, ось поворота которых должна иметь горизонтальный наклон порядка 45° или менее. При их совместном использовании с традиционным рулем (*несколько большей площади*) поворотные насадки создадут восстанавливающие моменты для стабилизации крена и дифферента, а при управляемой нагрузке на винтах, для исключения рыскания на курсе;

2. Кормовая палуба и ют находятся на уровне 2.5 м, там возможно размещение буксирной лебедки с механизмами, укрытыми в кормовой надстройке. Предусмотрен кормовой портал для буксируемых драг и подводных аппаратов, который при необходимости можно использовать в качестве грузового устройства, в том числе при спасательных операциях;

3. Буксирный трос может быть подан на другое судно в качестве швартова с регулируемым натяжением, что при динамическом позиционировании поворотными насадками и задействовании поворотного портала позволит обеспечить транспортный мост на аварийное судно при проведении спасательных операций в штормовых условиях;

4. На низком баке, высота палубы которого составляет 1.2 м, могут быть установлены кат-балки и океанографические лебедки, в том числе обслуживаемые непосредственно из помещений носовой надстройки, что позволит проводить океанологические работы в условиях заливаемости палубы бака;

5. Второй комплекс океанографических лебедок может быть установлен в средней части корпуса, где рабочая палуба также находится над уровнем моря 1.2 м, но укрыта от прямых ударов волн за носовой надстройкой;

Графиками распределения энергии корабельного волнообразования вдоль корпуса судна подтверждается минимизация волнообразования в носовой части корпуса в сравнении с кормовой. Принимая принцип обратимости волнообразования и воздействия на корпус со стороны внешнего волнения, можно считать, что также будет снижена

интенсивность воздействия на носовую часть корпуса со стороны океанской зыби и штормового волнения.

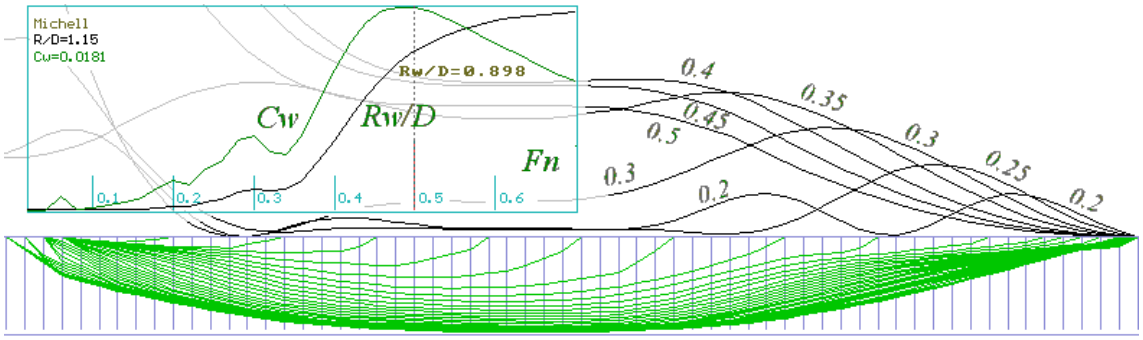


Рис. 62. Расчет волнового сопротивления и корабельного волнообразования *для судна повышенной штормовой мореходности. Слева вверху приведены графики коэффициента волнового сопротивления (Cw) и удельного волнового сопротивления (Rw/D). Вдоль корпуса показано распределение интенсивности излучения корабельного волнообразования на различных скоростях хода*

Минимальная высота бака с забортными спонсонами устроена для выполнения работ со спасательным и гидрофизическим оборудованием, где в штормовых условиях могут задействоваться управляемые из носовой надстройки автоматизированные кат-балки. В данном случае малая высота борта является определяющим условием возможности успешного проведения спасательных и научных работ, в том числе с позиций безопасности палубной команды при работе с громоздкими и тяжелыми забортными устройствами.

Низкий бак не допускает возможности подбрасывания носовой оконечности судна при накате и под ударами встречных штормовых волн. Как следствие общего снижения килевой качки, в экспериментах с телеуправляемыми моделями в открытом штормовом море получено подтверждение отсутствия опасной зарываемости низкого бака под гребнями штормовых волн на ходу судна.

Большая ширина корпуса на уровне действующей ватерлинии и широкая верхняя палуба допускают развитие интенсивной бортовой качки, которую желательно синхронизировать с фазовыми углами волновых фронтов для удержания плоскости палубы параллельно мечущейся поверхности штормовых волн. Продольная неразрывная палубная рубка препятствует свободному перетоку больших объемов

воды с одного борта на другой, что предотвращает резкий крен под ударом наветренной волны, и создает условия для безопасной работы с забортными устройствами на борту подветренном. Укрытые площадки с бортовыми спонсонами и океанографическими лебедками устроены в закрытой нише за носовой надстройкой.

Кормовая палуба имеет существенно большую высоту борта, так как там в штормовую погоду выполняются работы с мощной буксирной лебедкой и с подъемным порталом, позволяющем проводить окончательные настройки и пусковой контроль буксируемых гидрофизических приборов непосредственно над рабочей палубой юта. Заливаемость кормовой палубы при работе со сложным океанографическим оборудованием нежелательна, и она естественным образом обеспечивается на ходу вперед под главными машинами.

При исправной работе глубоко посаженного руля возможно штормование курсом по волне, чему будет помогать смещенная в нос надстройка. Хорошая обтекаемость корпуса в носовой части образована зауженными ватерлиниями. Кормовые обводы, напротив, имеют повышенную полноту, что при штормовании кормой на волну делает судно подобным средневековым парусникам. Умелое использование руля позволит в режиме штормования кормой на волну фактически обрести активный ход по волне, словно под парусом поморских кочей.

4. Варианты рыболовных траулеров

П*атент № RU-253 5382.*

Условия производственной деятельности рыболовного траулера предопределяют традиционно необходимые проектные условия к обводам и общекорабельной архитектуре:

1. Кормовая часть корпуса должна иметь две палубы, расположенные над главной палубой прочного водонепроницаемого корпуса:

- закрытая палуба рыбообрабатывающего цеха, в производственной деятельности которого используется большое количество забортной воды, свободно сливаемой за борт через большие шпигаты или полупортики;

- верхняя траловая палуба, общая площадь, длина и ширина которой должны позволять одновременную работу с двумя рыбопромысловыми тралами, обеспечивая постановку второго трала сразу же после подъема на борт рабочего трала с уловом;

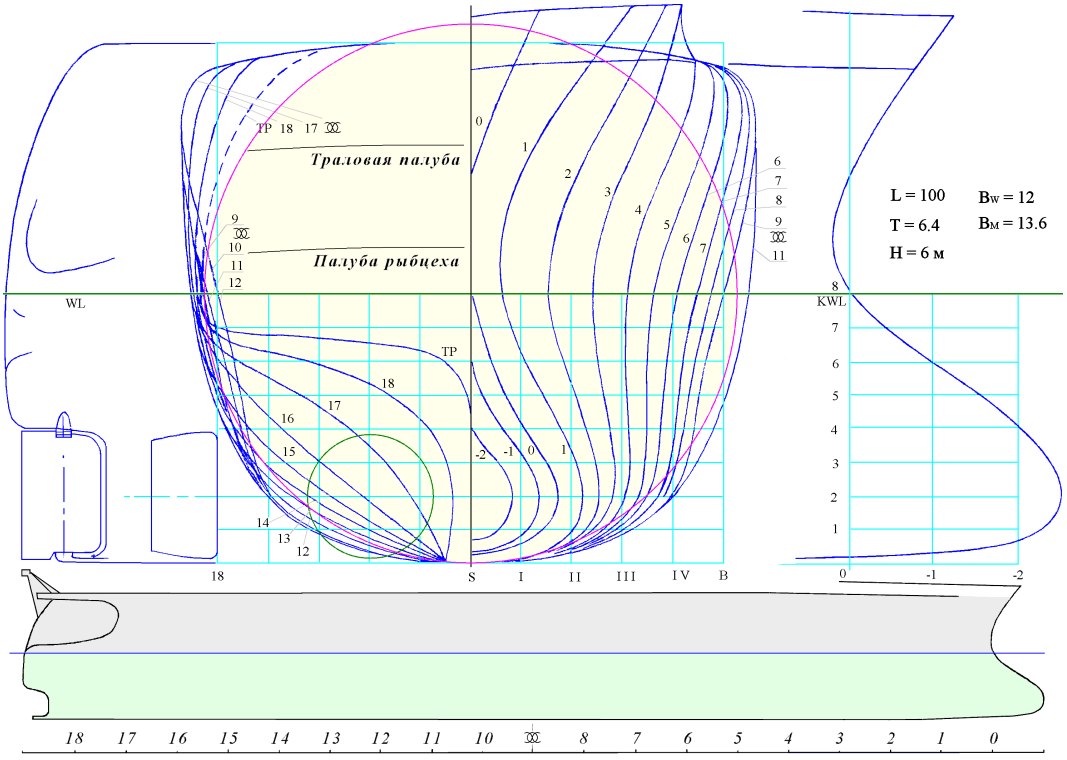


Рис. 63. Построение корпуса рыболовного траулера *с освобожденной для килевой качки носовой оконечностью и транцевой кормой, прижатой к уровню моря потоком движителей («двойной клин»).*

2. Широкая корма устраивается для работы с траловыми досками, переключение которых между поднимаемым и готовящимся к постановке тралами должно производиться в бортовых «карманах» в районе тралового слипа;

3. Вся траловая палуба закрывается с бортов от воздействий ветра и забрызгиваемости, борт заваливается внутрь для уменьшения бортовой качки под ударами штормовых волн;

4. С ходового мостика обеспечивается обзор траловой палубы, что важно для контроля безопасности траловой команды при штормовом маневрировании;

5. Доступ в рефрижераторный трюм может быть устроен с помощью люковых и грузовых устройств на палубе бака, обеспечивающими перегрузку рыбопродукции в открытом море.

В варианте с носовым бульбом форма корпуса рыболовного траулера может быть образована «двойным клином» (рис. 63) со скуловыми шпангоутами, обеспечивающими демпфирование килевой/вертикальной качки, и с полной транцевой кормой, обеспечивающей удержание кормой части корпуса траулера на уровне взволнованной поверхности моря. Стабилизировать «двойной клин» на волнении можно уменьшением отношения ширины к осадке, приданием обводам корпуса свойств для закручивания набегающего потока под днище как можно ближе к миделю, тем самым гидродинамически сближая носовую скулу с кормовой раковиной.

Форма корпуса в виде «двойного клина» дает определенные положительные мореходные качества траулеру, как то:

- возможность максимального расширения траловой палубы за счет демпфирующего качку развала бортов, в том числе в средней части корпуса;

- устройство «очень короткого» кормового подзора за счет повышенной полноты подводных ветвей шпангоутов в районе ахтерштевня («бульбовый ахтерштевень») позволит несколько снизить воздействие попутного волнения на объемную транцевую корму;

- внутренний завал транца и надводной части кормовых шпангоутов позволит снизить динамическое и кренящее воздействие волнения при ходе рабочим курсом с тралом по волне;

- длинный ахтерштевень, достигающий крайней кормовой точки по длине корпуса, позволит стабилизировать положение транцевого слипа на ходу на волнении, что важно для безопасности команды при выборке/поставке трала в свежую погоду;

- подрез бульба (подъем килевой линии в сторону носа) должен несколько стабилизировать рыскание траулера в условиях бортовой качки.

Обводы типа «двойной клин» обладают и существенными недостатками:

- бульбовый нос и развал надводных ветвей шпангоутов в носовой части корпуса ограничивает выбор штормового курса, что при усилении ветра выводит судно из эксплуатации в режим аварийного штормования малыми ходами курсом строго носом на волну;

- развал бортов в средней части корпуса может привести к интенсивной бортовой качке корпуса, в том числе на косых курсах по волне и зыби в свежую погоду;

- «двойной клин» должен обеспечиваться избыточной прочностью корпуса для условий работы при резкой килевой и бортовой качке под натиском умеренных штормовых волн.

Рассмотренный проект рыболовного траулера с корпусом в форме «двойного клина» (рис. 63) представляет вариант общекорабельной архитектуры, когда в оптимизационных решениях наибольший вес имели функциональные особенности траулера, что привело к существенным противоречиям в достижении эффективности и безопасности работ в штормовых условиях.

Вариант выбора традиционного и исторического прототипа.

Эволюционная оптимизация обводов корпуса для условий штормового плавания приводит к однообразным проектным решениям. В качестве прототипа используем поверенный морской практикой корпус исторического броненосца, с низким баком и крейсерской кормой, обеспечив традиционные для современного супертраулера (рис. 64) рыбопромысловые и рыбообрабатывающие технологические возможности.

Снова используем принцип «утки с заостренным форштевнем» для носовой оконечности корпуса, при котором гребень встречной волны образует ослабленный дифферентующий момент за счет смещения сил всплытия ближе к средней части корпуса, а кормовой подзор обеспечивает удержание потока в районе движителей и стабилизирует корпус относительно среднего уровня в возмущенном, но стабилизированном потоке в кормовой части траулера.

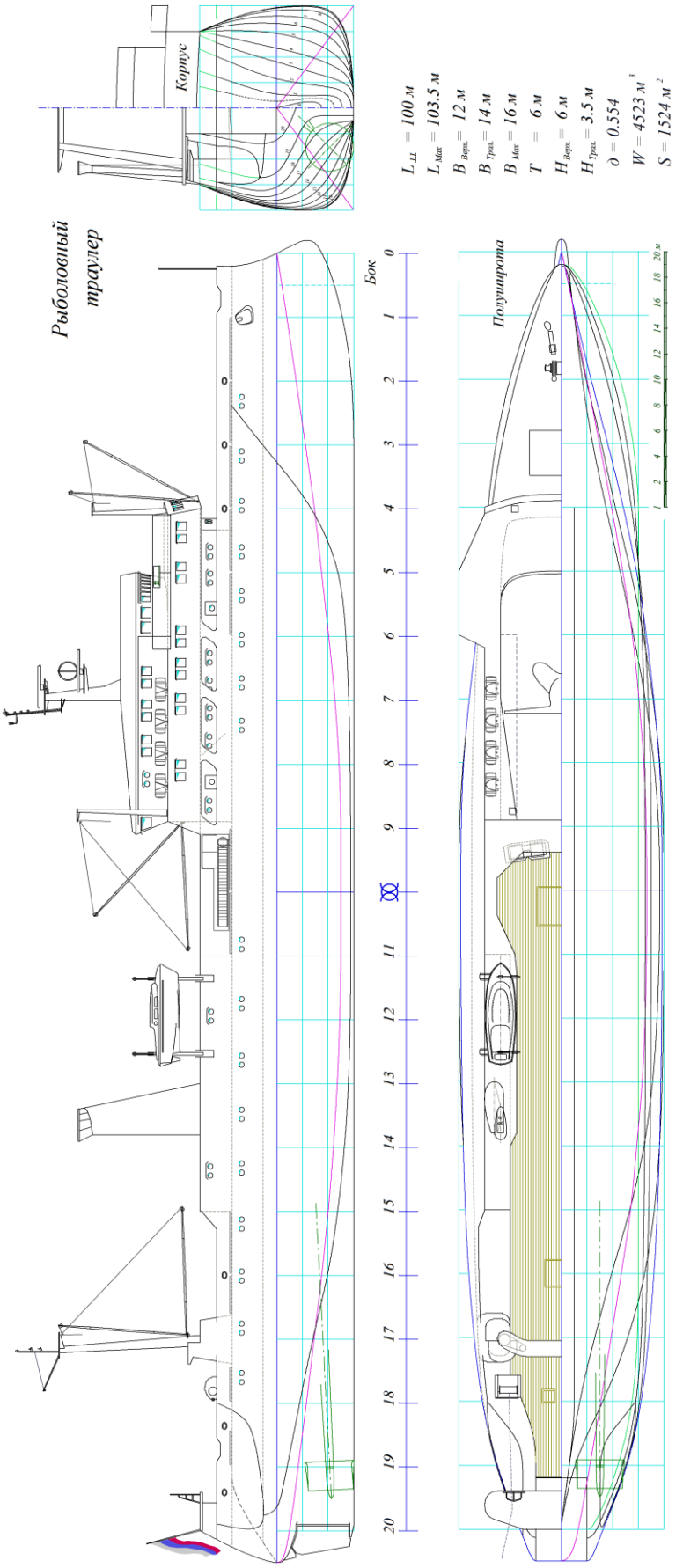


***Рис. 64. Рыболовный траулер,** скомпонованный по прототипу РТМС «Прометей» (суператлантик), имеющий традиционные соотношения главных размерений, форму корпуса и общеархитектурные особенности исторического корабля конца XIX – начала XX веков*

Условия производственной деятельности рыболовного судна не изобилуют оригинальностью схем развертывания орудий лова, что ограничивает многообразие технических решений в построении обводов и компоновке общекорабельной архитектуры. В промысловом рейсе мореходные качества судна в полной мере обеспечивают работоспособность экипажа в условиях штормов и ледяных ветров северных морей:

1. Обитаемость, достаточная для активных действий с орудиями лова на верхней палубе и непрерывных внутрисудовых работах в рыбцеху:

– движение произвольными курсами с тралом, в рыбопоисковом режиме и на переходах между рыбопромысловыми участками;



Рис. 65. Рыболовный *траулер в корпусе корабля XIX века.*

– активное маневрирование с траловой командой на промысловой палубе при постановке/выборке орудий лова.

2. Режимы хода или дрейфа при свернутых орудиях лова и остановленных промысловых и производственных операциях:

– швартовые операции в открытом море для приема запасов и передачи готовой рыбопродукции;

– аварийные режимы плавания и штормование в ожидании спокойной погоды.

Рыболовный флот, весь без исключения, не обеспечивается техническими решениями по безопасности мореплавания, что оставляет востребованным судоводительский опыт хорошей морской практики при выполнении сложных морских промысловых операций. Это обусловливает важность участия в проектировании новых судов автори-

тетных капитанов-наставников, способных воспринимать инженерные новации с позиций многолетнего опыта командования судном в промысловых рейсах, позволяющего незамедлительно и уверенно отрабатывать оптимальные варианты или эффективные методы практического применения новой морской техники.

Существенное замечание. Рыбопромысловые суда должны работать на мелководных банках в открытом море или в шельфовых акваториях вблизи побережья, где возможно проявление быстродвижущихся девятых валов длинноволновой природы. Штормовое судовождение в условиях мелководного волнения является особо опасным, и каждый судоводитель должен обладать знаниями и навыками безопасного прохождения через обрушающиеся гребни крутых волн на мелкой воде. Для новых рыболовных судов методы маневрирования в особо тяжелых погодных условиях должны оптимизироваться на этапах проектирования и затем тщательно отрабатываться с использованием вычислительных и опытовых экспериментов в открытом море и на прибрежном мелководье.



***Рис. 66. Рыболовный траулер в условиях жестокого волнения**. Испытания самоходной радиоуправляемой модели не выявили опасных режимов штормового плавания. Несмотря на малую мощность двигателей, траулер сохраняет способность двигаться и маневрировать на любых курсах относительно волнения*

Следование формальным требованиям пассивности корпуса к силовому воздействию морского волнения приводит к согласованию множества проектно-технических решений и улучшению мореходных и эксплуатационных качеств траулера в целом:

- стабилизация килевой качки улучшит работу гидроакустической аппаратуры, которая может быть установлена в выдвижных гондолах под днищем в средней части корпуса;

- завал бортов в средней части корпуса уменьшит бортовую качку, что создаст более комфортные условия работы экипажа и обеспечит безопасность траловой команды при сложных операциях с орудиями лова;

- уменьшение ширины транцевой кормы снизит силовое воздействие при захвате корпуса попутной волной, что важно для безопасности траловой команды, сохранности орудий лова и палубного оборудования при операциях постановки/выборки трала.

Размещение траловых досок в бортовых уступах обеспечит доступ и обслуживание их обычными палубными грузоподъемными механизмами и надежное крепление «по штормовому» без перегрузки на рабочую палубу.

Добротным прототипом общеархитектурного построения рыболовного траулера повышенной мореходности будет традиционный траулер «Суператлантик», скомпонованный в корпусе аналогичного по водоизмещению исторического корабля XIX века (рис.64). Суператлантик способен за 24 дня работы на промысле добывать и брать на борт порядка 1200 тонн рыбопродукции.

Проектные характеристики оптимизированного для штормового плавания траулера:

Длина наибольшая / ватерлинии	L	103.5 / 100 м;
Ширина наибольшая	B	16 м;
Ширина на уровне траловой палубы	$B_{Трал}$	14 м;
- по верхней палубе средней надстройки	B_{Deck}	12 м;
Осадка	T	6 м;
Высота надводного борта до траловой палубы	$H_{Трал}$	3.5 м;
- до верхней палубы средней надстройки	H_{Deck}	6 м;
Водоизмещение	W	4 523 $м^3$;
Площадь смоченной поверхности	S	1 524 $м^2$;
Коэффициент общей полноты	δ	0.554.

Построение крейсерской кормы и свободно заливаемой в штормовом море палубой бака связывается конструктивными доработками, способствующими улучшению условий проведения промысловых операций в штормовом море:

1. В кормовой части устраивается два яруса выше главной палубы прочного водонепроницаемого корпуса:

– шельтердек рыбообрабатывающего цеха, через полупортики которого сбрасываются потоки использованной в производстве морской воды;

– верхняя палуба обеспечивает одновременную работу с двумя рыбопромысловыми тралами (дублем) при их подъеме/постановке; укрывается от ветра заваленным внутрь корпуса бортом, что ослабляет бортовую качку под ударами гребней волн и шквальных ветров.

2. Зауженная (крейсерская) корма ограничивает доступ в опасную зону под траловым мостиком и дает возможность полной механизации операций с траловыми досками в бортовых уступах под грузовыми шкентелями кормового портала и трал-мостика, в непосредственной близости от ваерных лебедок.

3. Обводы корпуса служат стабилизации траловой палубы на ходу вперед, при букировке и постановке/выборке орудий лова в условиях интенсивного волнения. Для этого кормовая часть утяжеляется за счет строительного дифферента на корму, а полнота носовых обводов уменьшается для исключения захвата корпуса гребнями волн, что освобождает рыскание и способствует беспрепятственному заливанию палубы бака потоками из гребней волн.

Штормовая стабилизация кормовой палубы проявляется в динамике погружения под гребни волн бортовых уступов и кормового слипа, которые могут служить «надводными успокоителями качки» (по определению В.П. Костенко), стабилизируя корпус в условиях захвата кормы попутной штормовой волной.

С ходового мостика обеспечивается обзор траловой палубы, что важно для контроля безопасности траловой команды в штормовом маневрировании судна. Непрерывная верхняя палуба позволяет тралмастеру разворачивать рыболовные снасти на всю длину траулера при

их ремонте или модернизации; упрощает перенос судовых запасов или грузов между носовым и средним трюмами в открытом море; а также способствует компенсации бортовой качки при боковом захлесте штормовых волн на верхнюю палубу.

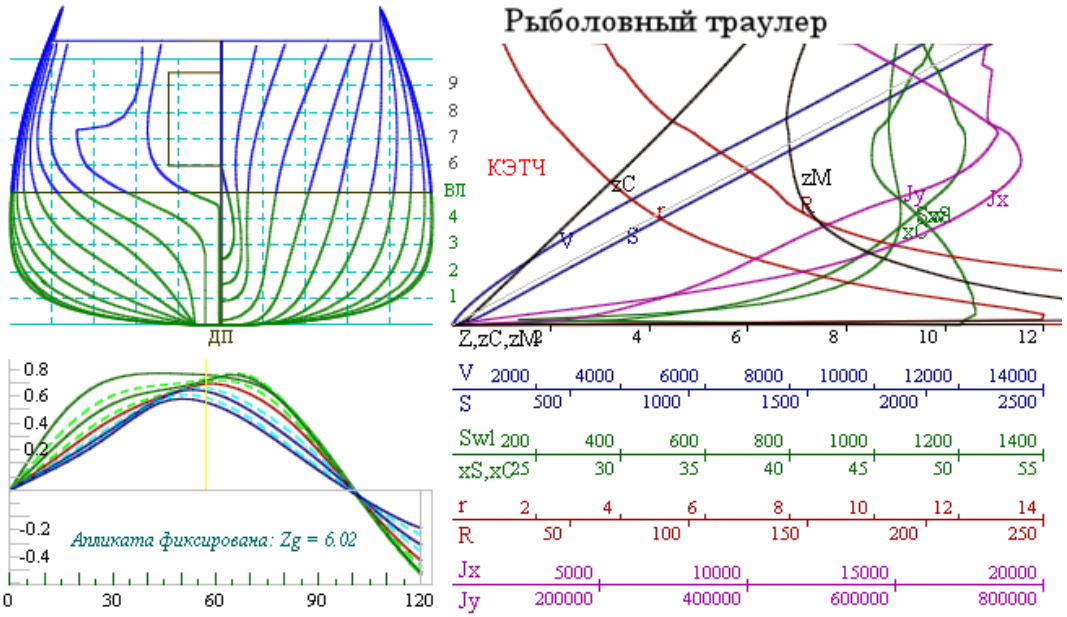


***Рис. 67. Кривые элементов теоретического чертежа** (справа) **и плечи остойчивости формы корпуса** (Zg=Zc, слева) **рыболовного траулера**, оптимизированного для работы на волнении. Кривая остойчивости для конструктивной ватерлинии выделена жирным, другие непрерывные линии соответствуют изменению осадки на 1 метр.*

На кривых элементах теоретического чертежа рыболовного траулера (рис.66) показано, что при погружении корпуса в штормовую волну, интенсивность как кренящих, так и дифферентующих моментов не будет усиливаться за счет возрастающих моментов инерции и площади погруженной ватерлинии, что является определяющим требованием по минимизации всех видов качки при работе с тралом в условиях интенсивного морского волнения.

Аппликата метацентра, абсциссы центров величины и площади ватерлинии практически не изменяют своих величин на всех рабочих осадках, в том числе динамически изменяющихся в результате вертикальной качки на морской зыби, что также должно благоприятно сказываться на поддержании уровня остойчивости и ослаблении рыскания, позволяя стабилизировать качку активными успокоителями с

удержанием судна в заданном режиме работы с тралом под автоматически управляемыми рулями, движителями и ваерными лебедками.

Варианты среднетоннажных рыболовных судов.

Полагая в качестве прототипа средний траулер-сейнер морозильный типа «Орленок» (проект Атлантик–333): L – 62,25 м; B – 13,8 м; T – 5,2 м; W – 2400 м^3 (2467 т); грузоподъемность 230 т; экипаж 40 чел., обводы корпуса строятся по аналогии с рисунком корабля Марко Поло из XIII века, что будет означать использование всех ключевых технических решений по оптимизации формы корпуса и общекорабельной архитектуры для достижения наилучшей штормовой мореходности рыболовного судна.

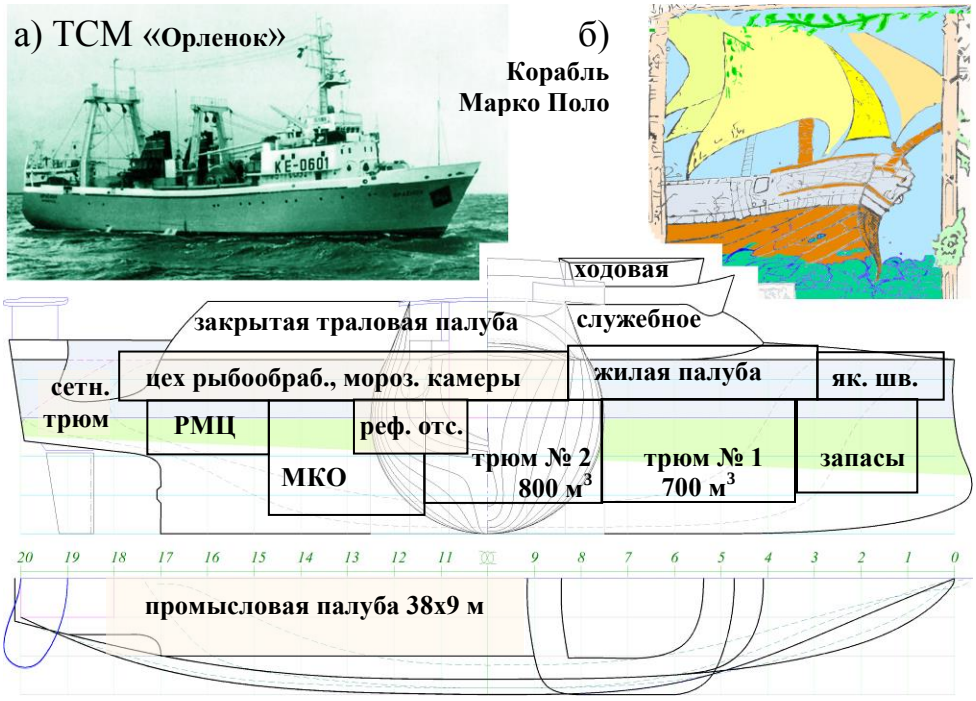


Рис. 68. Траулер-сейнер морозильный *с рыбопромысловым оснащением по прототипу Атлантик–333 («Орленок»), скомпонованный в корпусе древнего китайского корабля, изображенного Марко Поло в XIII веке. L = 60 м; B = 15 м; T = 7,5 м; W = 3444 м^3; S = 1 500 м^2; δ = 0,55. (МКО – машинно-котельное отделение; РМЦ – рыбомучной цех). Обводы корпуса траулера сбалансированы на отсутствие ходового дифферента на тихой воде, и такая динамическая стабилизация не нарушается на крупном волнении, где в движении энергия волн переходит преимущественно в вертикальную качку, без прямого влияния на ходкость и устойчивость на штормовом курсе*

Якорно-швартовные устройств размещаются в закрытом помещении форпика (рис.68), укрывается от ветров и ледяных брызг промысловая палуба, что важно для организации эффективной работы экипажа в зимних условиях холодных морей России. Минимальная по площади палуба бака устраивается для открытого доступа к горловине трюма № 1, что необходимо для выгрузки мороженой рыбопродукции в открытом море в спокойную погоду или в укрытии высоких бортов транспортного рефрижератора.

В обводах траулера использовано техническое решение по гидродинамической компенсации килевой качки при движении судна произвольным курсом относительно штормовых волн трохоидальной природы. В процессе суперпозиции встречных штормовых и соразмерных корабельных волн силовое воздействие концентрируется в районе скуловых обводов, где дифферентующие моменты вырождаются в поступательные силы вертикального всплытия/погружения корпуса. Необходимым условием такого процесса является сохранение посадки и отсутствие ходового дифферента на тихой воде, даже при движении испытываемой модели на закритически высоких скоростях хода.

В мореходных испытаниях также ставился вопрос об уменьшении потенциально опасных последствий вертикальной качки[37], которая на больших скоростях хода сопровождается заливаемостью носовой палубы и почти полным всплытием корпуса между гребнями волн. Использование округлых шпангоутов позволяет сохранять величину метацентрической высоты при различных посадках судна в условиях вертикальной качки, что может использоваться в законах автоматического управления рулем с упреждающей посылкой команд на стабилизаторы бортовой качки для предотвращения неуправляемо-

[37] У неоптимизированного корпуса вертикальная качка не менее интенсивна, и лишь усугубляется динамикой килевой качки, потерей хода и рысканием под прямыми ударами волн. Судно вынужденно снижает ход до малого и лишается функционального назначения в наивысшем уровне опасности плохо управляемого судна.

го крена на циркуляции, опасного для траловой команды при промысловых операциях на верхней палубе в штормовую погоду. Если активные крыльевые успокоители качки устанавливаются в потоке гребных винтов, то их эффективность будет сохраняться при рыбопромысловых операциях с тралом или другими забортными орудиями лова.

Завышенная до 7,5 м осадка траулера обеспечивает его устойчивое движение в штормовом море с соразмерными по величине гребнями ветровых волн и зыби. За счет такой осадки водоизмещение увеличивается более чем на 1000 тонн, что соответствует рангу большого траулера с исходными размерениями среднего. Увеличение судовых запасов и объема грузовых трюмов требуется для автономной работы судна в удаленных промысловых районах Тихого океана, не обеспеченных обустроенными портами-убежищами, что является важнейшим эксплуатационным требованием к перспективному проекту траулера.

Традиционными рыбопромысловыми судами для Дальнего Востока России являются сейнеры-траулеры водоизмещением порядка 800 м^3. Рассмотрим построение аналогичного варианта среднего траулера, обеспечивающего укрытие палубной команды в штормовых условиях зимних сезонов северо-западной части Тихого океана. В качестве прототипа используется современный траулер СТР–420 типа «Надежный»: L – 44,9 м; B – 9,5 м; T – 3,8 м; W – 806 м^3 (781 т); трюм 200 м^3 (100 т) с охлаждением до –7 °С; экипаж – 22 чел.

Дополнительное в сравнении с прототипом водоизмещение нового траулера используется на увеличение мощности морозильного оборудования, устройство рыбообрабатывающего цеха, а также на увеличение объема морозильного трюма и количества судовых запасов для автономного плавания вдали от рыбных портов.

Обводы корпуса аналогичны предыдущему проекту траулера (рис.68). Основное отличие в отсутствии яруса шельтердека (рис.69), что делает траловую рыбопромысловую палубу главной палубой прочного водонепроницаемого корпуса. Палуба рыбцеха и бытовых помещений опускается ниже ватерлинии. Для обеспечения аварийной

непотопляемости жилая палуба включается в герметичный контур надводного запаса плавучести. Палуба бака с якорно-швартовными устройствами закрывается надстройкой, с выводом швартовов через роульсы в укрываемых от ветра и волн полупортиках, что необходимо для предотвращения обледенения, сохранения остойчивости и минимизации бортовой качки в условиях сильной штормовой заливаемости носовой оконечности корпуса.

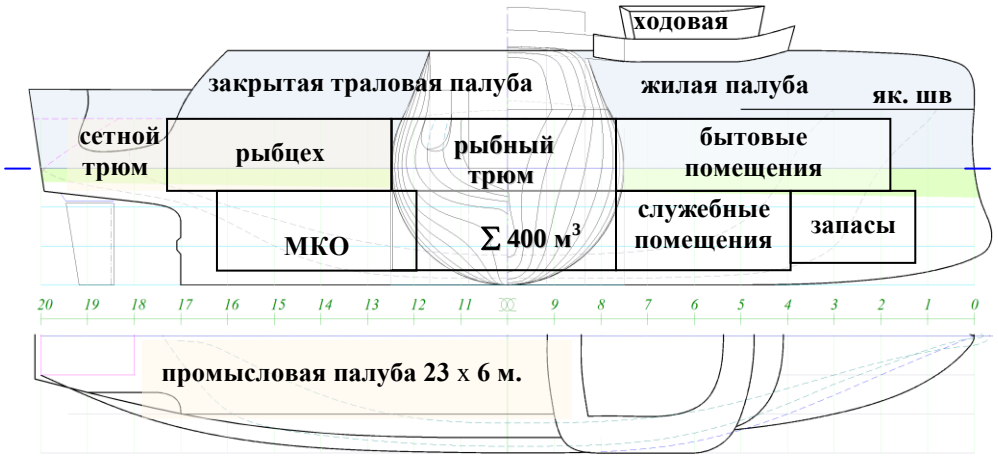


Рис. 69. Обобщенная схема размещения сейнера-траулера *повышенной штормовой мореходности. L = 40 м; B = 10 м; T = 5 м; W = 1020 м³*

Глубокий трюм позволяет выбирать высоту укладки производимой рыбопродукции, тем самым регулируя изменение начальной гидростатической остойчивости в зависимости от текущего количества топлива и судовых запасов траулера. Для работы с траловыми досками в кормовой раковине устроены бортовые уступы. Кормовой слип имеет перекрытие для перестройки рыбопромысловой схемы на работу с неводами. Зауженная корма минимизирует внешние нагрузки на ходу по волне и при выборке трала, а судоводитель обладает определенной свободой в выборе курса и тяги на главных двигателях.

В мореходных испытаниях подтверждается столь же устойчивый режим хода с прорезанием гребней штормовых волн, в котором траулер практически не искажает формы рассекаемых волновых фронтов, что является условием сохранения ходкости и плавности килевой качки на крупном штормовом волнении.

5. Пассажирское судно

Заявка на изобретение: **№ RU-2016150049** от 2016-12-19.

Главным требованием к пассажирскому судну является обеспечение безопасности в сложных и штормовых условиях плавания, в том числе при остановке главных двигателей и полной потере управления и контроля за динамикой судна в обстановке интенсивного волнения и ураганного ветра. К важным эксплуатационным требованиям можно отнести обеспечение комфортности обитания при плавании на интенсивном морском волнении, а также устройство высоких палубных надстроек, в которых должны располагаться комфортабельные жилые помещения.

Близким по мореходности историческим прототипом может быть выбрана средневековая каравелла с высокой кормовой надстройкой и заниженным баком, не обладающим свойством всхожести на волну и не противостоящим заливаемости носовой палубы.

Каюты пассажиров и экипажа, бытовые и вспомогательные помещения расположены ниже главной палубы вдоль бортов по всей длине корпуса. Переходы между водонепроницаемыми отсеками (в случае общесудовых тревог) устроены внутри непрерывной продольной рубки на верхней палубе. Высоко над водой, в защищенной от воздействия волн и качки кормовой надстройке, расположены комфортабельные каюты, зоны отдыха и общественные помещения.

Проектные характеристики формы корпуса каботажного судна:

Длина наибольшая / ватерлинии	L	103 / 100 м;
Ширина наибольшая /ватерлинии	B	16 / 15.2 м;
Ширина по верхней палубе	B_{Deck}	13 м;
Осадка	T	5 м;
Водоизмещение	W	4 400 $м^3$;
Площадь смоченной поверхности	S	1 620 $м^2$;
Коэффициент общей полноты	δ	0.58.
Скорость хода максимальная (F_n=0,33) –	$V_м$	20 узл.
… экономичная, штормовая (F_n=0,15) –	$V_э$	9,1 узл.

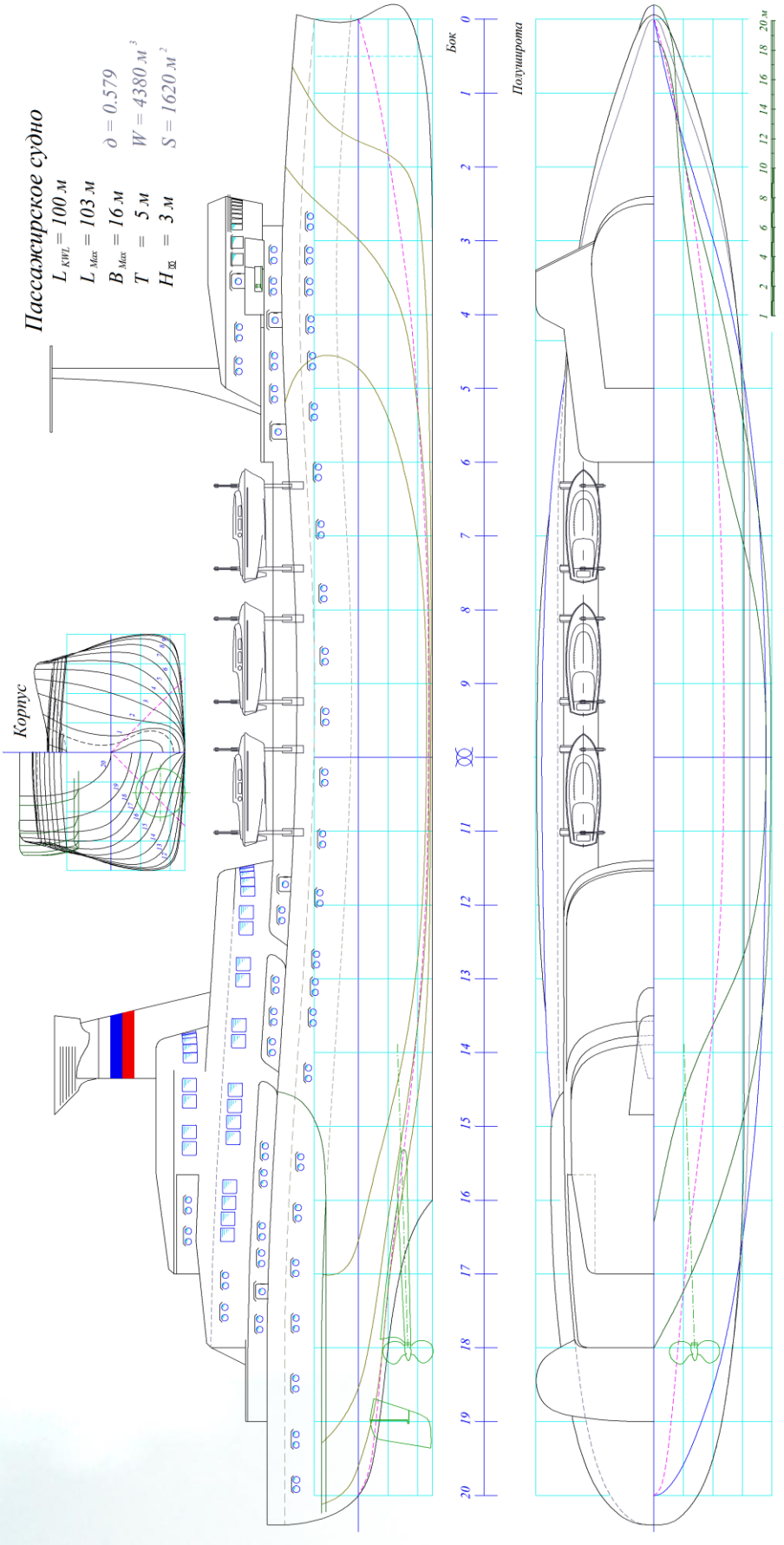


Рис. 70. Гипотетический проект пассажирского судна *со схематичной прорисовкой общего расположения*

. Форма корпуса и надстроек выбраны с учетом необходимости снижения силового взаимодействия со штормовым волнением и обеспечивают пассивное штормование на курсе носом на волну при остановленных двигателях

Для обеспечения возможности работы судна в небольших гаванях Курильских островов и других плохооборудованных гаванях Дальнего Востока России осадка ограничивается величиной T = 5.0 м, что при максимальной ширине B = 16 м составит довольно большую величину отношения ширины к осадке B/T = 3.2.

Двухвинтовая схема движителей и мощная силовая установка позволяют судну самостоятельно преодолевать навигационные трудности и уверенно проходить ворота необустроенных портопунктов, где предусматривается ускоренное выполнение погрузо-разгрузочных операций у стационарных причалов, с безусловной возможностью последующего возвращения на плановые каботажные маршруты в любых погодных условиях.

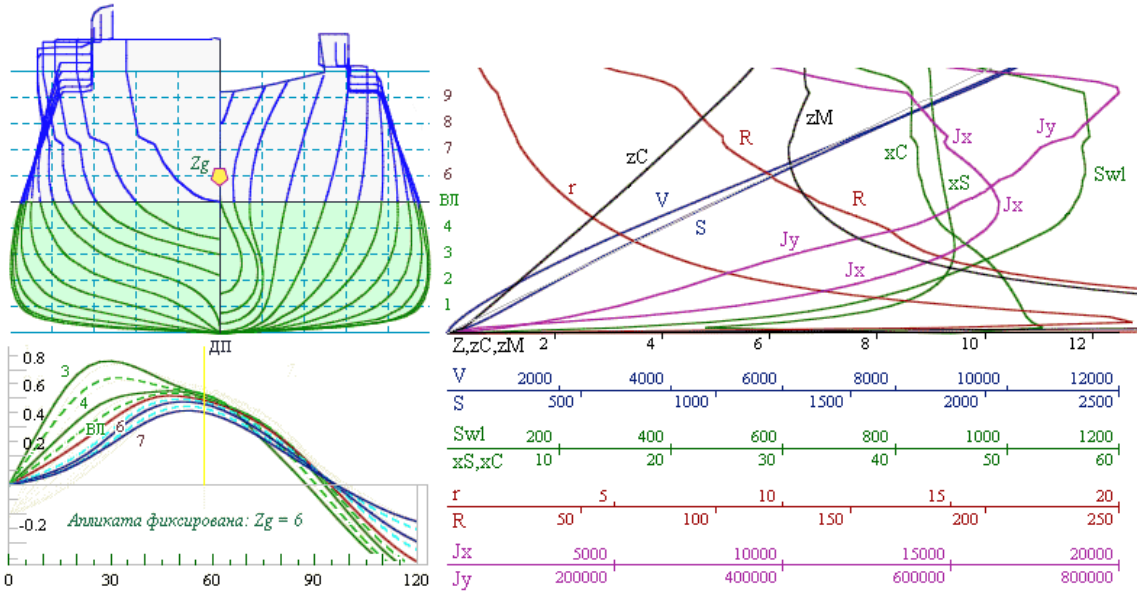


Рис. 71. Кривые элементов теоретического чертежа и плечи остойчивости *(Zg=6 м) при различных осадках. На конструктивной осадке метацентрическая высота h=6 м*

Корпус пассажирского судна может иметь малый коэффициент общей полноты, что позволяет основной объем подводной части корпуса сосредоточить в его средней части и допустить заострение и уменьшение инерции подводных объемов и площади ватерлинии в оконечностях. Носовая часть корпуса образована вертикальным бульбовым форштевнем, который улучшает обтекаемость корпуса на больших скоростях хода. Надводный борт в носовой части корпуса при встрече с волной выполняет роль княвдигеда и практически не

обладает всхожестью на волну. Однако, в условиях пассивного штормования, бак, принимая на себя первый удар обрушающегося высокоскоростного гребня, разрушает монолитность фронта встречной волны, частично защищая таким образом ходовую рубку и среднюю часть корпуса.

Кормовая часть корпуса выполняет роль надводного «штормового флюгера». Кормовой подзор почти «плоский» и без плавникового ахтерштевня. Это делает корму свободной для рыскания при всплытии на волне, тем самым ослабляя кренящие нагрузки в условиях, когда бульбовый нос удерживает общий центр бокового сопротивления ближе к носовой части корпуса.

Несмотря на большую ширину корпуса и относительно малую осадку, кривые элементов теоретического чертежа и плечи остойчивости формы (рис. 43) подтверждают удовлетворение основных требований к форме корпуса, обусловленных завалом бортов и малой полнотой оконечностей:

- на конструктивной осадке диаграмма остойчивости будет иметь S-образную форму, что позволяет безопасно снижать остойчивость для увеличения периода бортовой качки и повышения комфортности обитания.

- при увеличении осадки площадь действующей ватерлинии не увеличивается, а ее продольный момент инерции уменьшается, что является одним из признаков гидродинамической пассивности корпуса при свободном плавании на взволнованной поверхности моря;

Узкие заостренные ветви носовых ватерлиний позволят судну поддерживать высокую скорость хода произвольным курсом относительно умеренного морского волнения и пологой океанской зыби, при этом в носовой части корпуса не будут развиваться большие кренящие или дифферентующие моменты, и встреча с гребнями волн не приведет к значительному усилению бортовой и килевой качки. Палуба бака не защищена от захлестывания высокоскоростными гребнями волн, поэтому там должна быть увеличена погибь бимсов, а в фальшбортах

устроены сплошные разрезы для быстрого сбрасывания воды с палубы за борт.

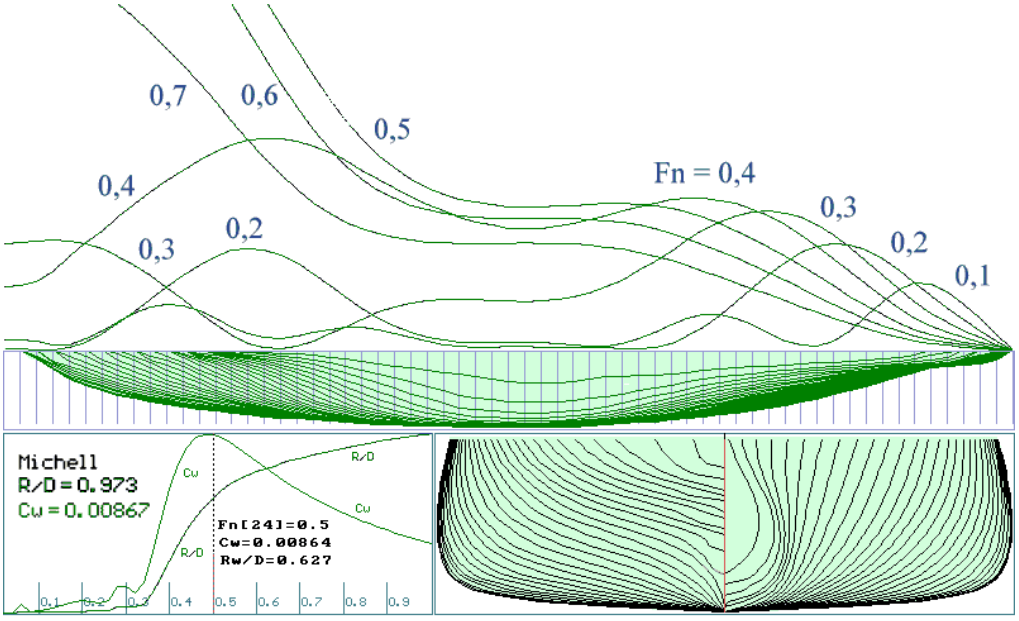


Рис. 72. Расчеты коэффициентов Cw и сил волнового сопротивления относительно водоизмещения R/D *для каботажного пассажирского судна. В верхней части рисунка приведены графики интенсивности излучения корабельных волн по длине корпуса, где иллюстрируется затягивание корабельной волны под носовую скулу на скоростях порядка Fn=0,3÷0,4 (18÷24 узл.)*

На большой скорости хода основные волновые нагрузки будут приходиться на носовую часть корпуса, а кормовой подзор окажется в возмущенном и частично сбалансированном потоке, что важно как для стабильной работы винто-рулевого комплекса, так и для обеспечения комфортных условий обитания в высокой кормовой надстройке.

В случае остановки главных двигателей, подобно флюгеру, судно самостоятельно выйдет на курс носом на волну, на котором удары волн будут приходиться на палубу бака и носовую надстройку, а кормовая часть корпуса окажется в частично стабилизированном волновом поле, укрытом от прямого воздействия гребней волн.

Каботажное пассажирское судно Сахалино-Курильского края

Варианты перспективных судов разработаны в рамках перспективного плана строительства каботажного пассажирского флота для всесезонной и всепогодной навигации на регулярных линиях Сахали-

но-Курильского края, в штормовых и ледовых условиях Охотского и Японского морей, и в северо-западных акваториях Тихого океана.

Формализация и синтез ключевых инженерных решений

Исходя из заданных условий навигации установлены обязательные требования к мореходным качествам судна, обеспечиваемые реализацией инженерно-технических достижений целевого непротиворечивого проектирования и хорошей морской практикой экипажа при эксплуатации перспективного судна по его прямому предназначению:

- прохождение заданных океанских маршрутов в акваториях Сахалина и Курильских островов в любых гидрометеорологических или особых навигационных условиях;

- способность к маневрированию и удержания курса с заданной скоростью на глубокой воде в открытом море в условиях ураганных ветров и штормового волнения;

- корабельные обводы и общекорабельная архитектура служат стабилизации корпуса при минимуме всех видов качки на ходу судна; с обладанием свойством автоматического приведения судна на безопасный курс носом на волну при потере хода (в аварийных ситуациях).

Ключевые инженерные решения непротиворечивого проектирования корабля повышенной штормовой мореходности в полной мере приемлемы в случае традиционных водоизмещающих судов неограниченного океанского плавания:

1. Малые поперечные и продольные моменты инерции на уровнях переменных ватерлиний и вогнутость надводного борта

→ снижение воздействия волнения и сохранение ходкости;

2. Уменьшение надводных объемов корпуса в оконечностях и завал борта на уровне действующей ватерлинии

→ стабилизация и высокая скорость хода на волнении в режиме прорезания волн;

3. Завал форштевня и надводного борта, уменьшение ширины и непрерывной площади верхней палубы

→ исключение ударов волн по корпусу и возможность активного управления ходом судна;

4. Перенос основных надводных объемов в кормовую часть корпуса, а центра величины подводного корпуса – в нос

→ безопасное штормование в режиме носом на волну, в том числе в аварийных режимах и с остановленными машинами;

5. Сведение к одной вертикали центров гидростатических и гидро-динамических сил при типовых посадках и режимах хода

→ обеспечение управляемости, стабилизации качки и хорошей ходкости на волнении;

6. Уменьшение высоты и парусности надстроек

→ "Красота корабля определяется отсутствием на его борту ненужных вещей", и в том числе – недопустимостью пустых надводных объемов.

Концептуальные предпроектные условия и ограничения

1. Выбор скоростного режима устанавливается всепогодностью морских переходов в южной части Охотского моря, что при 9-11 узлах возможно в случае специального проектирования судна повышенной штормовой мореходности. Т.е. выбирается регулярность работы пассажирской линии, строго по расписанию с заданной проектной скоростью, в любых гидрометеорологических и ледовых условиях (отказываемся от высокоскоростных проектов с гигантским расходом топлива и многодневными ожиданиями у моря хорошей погоды, эту задачу – успешно решают самолеты).

2. Выбор чисто пассажирского или грузо-пассажирского варианта остается за заказчиком. В случае пассажирского судна уменьшается его стоимость, повышается комфортабельность и появляется возможность размещения общественных помещений: ресторанов, салонов для отдыха и. пр. В эпоху автомобилизации высока актуальность путешествий на джипах с жилыми блоками; на туристических автобусах с камбузами и бытовыми удобствами, для чего на судне необходима аппарель для выкатки колесной техники на простые курилоостровские и сахалинские рыбацкие причалы или слипы.

3. Главные размерения судна заданы судостроительным заводом - 75 х 16 х 4,3 м. Важным требованием является увеличение осадки до 5 м. для умерения качки, улучшения штормовых мореходных качеств, увеличения грузоподъемности, и обретения других полезных эксплуатационных свойств. Водоизмещение в этом случае составит порядка 3,5 тысяч тонн (пассажирское - накатно-пассажирское).

4. Количество пассажиров – 250 человек, с экипажем до 50 человек, ограничивается вместительностью спасательных шлюпок, где должны размещаться 50 % от общего числа пассажиров и экипажа по каждом борту. При заданной длине судна расположить по каждому борту можно расположить до трех 50-местных шлюпок, а также дежурный катер, не включаемый в число спасательных средств.

Общеархитектурное построение двух вариантов пассажирского и накатно-пассажирского судна

С использованием предложений проекта технического задания для Хабаровского судостроительного завода, по результатам экспертного изучения эксплуатационных и навигационных требований к новому перспективному судну, синтезируется свод характеристик и инженерно-технических решений для вариантов пассажирского и накатно-пассажирского судов:

1. Пассажирское / накатно-пассжирское судно предназначено для каботажных, до 1000 миль, регулярных морских и океанских линий Сахалина и Курильских островов, с возможностью горизонтальной загрузки колесной техники и попутных грузов;

2. Район плавания неограниченный, с возможностью активного маневрирования и штормовых и ледовых гидрометеорологических условиях на глубокой воде в открытом море и в прибрежных узкостях на подходах к морским портам Сахалина и Курильских островов;

3. Класс судна Российского Морского Регистра судоходства: КМ ® Arc4 AUT3-ICS RO-RO Passenger ship;

4. Архитектурно-конструктивный тип: судно со стальным корпусом и надстройками из морского алюминия, одновинтовое, с двухостровным расположением надстроек и открытой верхней палубой,

оснащенное кормовой аппарелью для колесной техники и горизонтальной обработки попутных грузов;

5. Основные характеристики:

Длина наибольшая / по ватерлинии	L	77,2 / 75 м;
Ширина подводная наибольшая /по ватерлинии	B	16 / 14.6 м;
Ширина по верхней палубе	B_{Deck}	15 м;
Осадка (не менее)	T	5 м;
Высота верхней открытой палубы на миделе	H	3 м;
Коэффициент общей полноты	δ	0.655.
Объемное водоизмещение	W	3 600 $м^3$;
Площадь смоченной поверхности корпуса	S	1 566 $м^2$;
Скорость хода форсированная (F_n=0,27) –	$V_м$	14 узл.
… экономичная, номинальная (F_n=0,22) –	$V_э$	11,6 узл.

В правилах Морского Регистра по оборудованию морских судов РС 2015 г., часть II – спасательные средства, п.3.1.1 – спасательные шлюпки и плоты указывается, что на пассажирских судах требуется иметь спасательные шлюпки по каждому борту вместимостью 50% от общего количества находящихся на судне людей, или суммарно – 100%. П.3.1.2 – оговаривается необходимость размещения на каждом борту по одной дежурной шлюпке.

Таким образом, проектируемое пассажирское и накатно-пассажирское судно может принимать на борт до 300 человек (условно: 50 – членов экипажа; 250 – пассажиров).

6. Остойчивость и стабилизация штормового маневрирования:

Судно обладает ярко выраженной S-образностью диаграммы остойчивости на конструктивной осадке (красная линия) что необходимо для исключения аварийного опрокидывания судна в случае непредвиденного снижения начальной остойчивости;

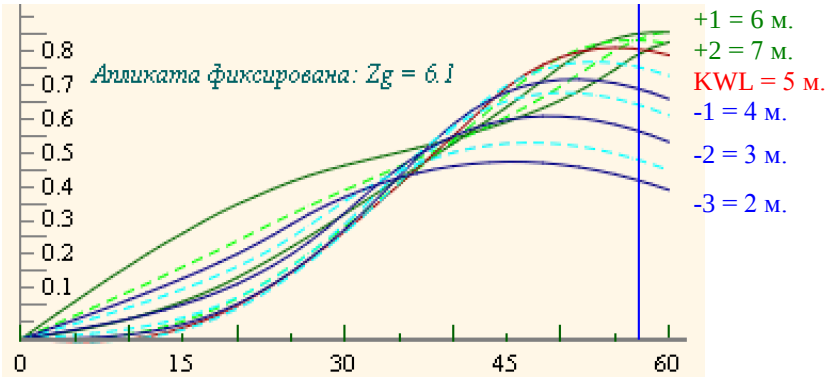


Рис. 73. Плечи статической остойчивости *при фиксированном положении аппликаты центра тяжести (в походном положении): Zg=6,1 м при различных осадках: от 2 м – в синие кривые, KWL=5 м – красная, и до 7 м. – зеленые.*

При любых изменениях посадки, в том числе в условиях вертикальной качки в штормовом плавании, происходит увеличение начальной остойчивости на ровном киле, что свидетельствует о соблюдении требования безусловной остойчивости в штормовом плавании.

Судно предлагается оснастить активным кормовым успокоителем килевой и ботовой качки – штормовым аварийным движителем (Патент RU 2384457), устанавливаемом на рудерпосту непосредственно в зоне прямого действия потока от гребного винта.

При должной оптимизации формы судовых обводов возможна гидродинамическая компенсация ходового дифферента на тихой воде, что благоприятно скажется на снижении силового воздействия штормовых волн в кормовой оконечности корабля. Интенсивная бортовая качка судна среднего водоизмещения может вполне качественно компенсироваться удержанием существенно больших собственных периодов качки корпуса (*малой начальной остойчивости*), что в Охотском море должно проявляться с периодами – более 8-10 сек, в Тихом океане – более 15 сек.

Использование бортовых килей или активных бортовых крыльевых успокоителей качки – принципиально недопустимо.

7. Ходовые качества судна:

В расчетах корабельного волнообразования и волнового сопротивления (рис.74) формы корпуса традиционно определяется коэффи-

циент Cw, необходимый для использования совместно с расчетами вязкого трения, либо более практичная величина R/D – отношение величины сопротивления к водоизмещению корпуса.

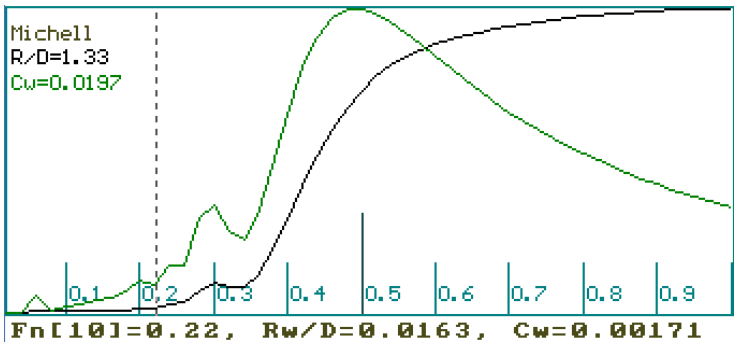


Рис. 74. Расчеты коэффициентов Cw и сил волнового сопротивления относительно водоизмещения R/D*. Пунктирна вертикаль отмечает минимум корабельного волнообразования для скорости относительной хода Fn=0,22 (11,6 узл.).*

Моделирование и анализ корабельного волнообразования необходим для обоснованного выбора номинальной скорости хода проектируемого судна, и востребуется в предварительных экспертных оценках интенсивности силового взаимодействия корпуса корабля со свободными штормовыми волнами трохоидальной (Герстнеровской) природы.

Номинальная скорость судна (Fn=0.22 ~ 6 м/с) – 11,6 узлов

Форсированный или штормовой ход (Fn=0.27~7,2 м/с) – 14 узлов

Гребной винт диаметром 3,6 м при 120-150 об/мин утилизирует оценочную мощность главного двигателя 1 300 кВт для достижения скорости хода 14 узлов. Тот же гребной винт на скорости хода 12 узлов требует порядка 770 кВт мощности, что существенно превышает 15% запас двигателя внутреннего сгорания для обеспечения форсированного или штормового хода. В случае применения гребного электродвигателя, задача экономичного варьирования мощностью нескольких одновременно работающих дизельных или турбинных электрогенераторов от 880 до 1500-1720 кВт представляется вполне реализуемой.

8. А. Архитектурное построение накатно-пассажирского судна.

На среднетоннажном судне (рис.75) задействование кормовой аппарели для горизонтальной загрузки колесной техники востребует

установку компактного маршевого электродвигателя в ограниченном по объему герметичном необслуживаемом отсеке – непосредственно в коротком тоннеле гребного вала.

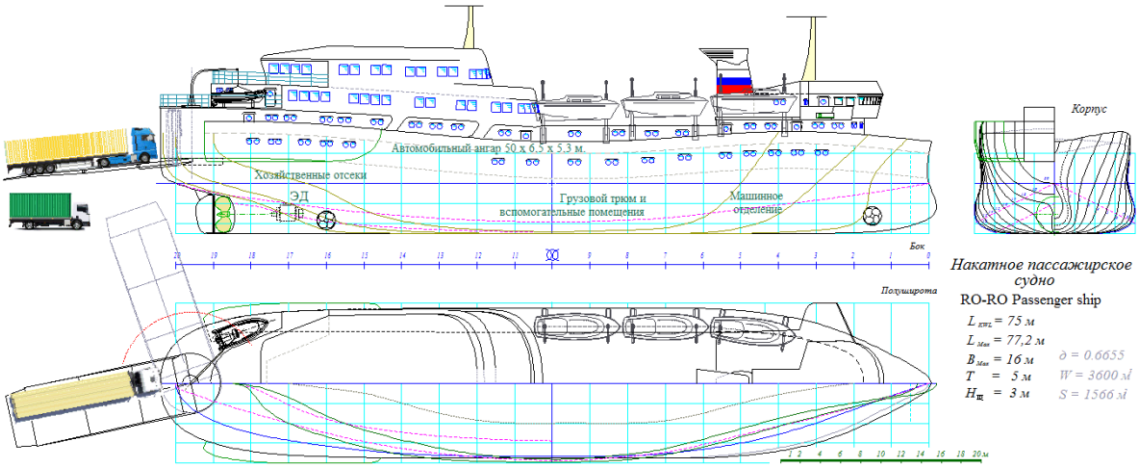


Рис. 75. Накатно-пассажирское судно.

Предельно короткий гребной вал и малогабаритность маршевого электродвигателя столь же актуальны для установки кормового подруливающего устройства с максимальным смещением в кормовую оконечность судна.

Востребованность электрогенераторов повышенной мощности определяется необходимостью обслуживания кормовой забортной аппарели и подволочных рельсовых тельферов, задействуемых в погрузочно-разгрузочных операция у причальной стенки, при остановленных маршевых электродвигателях (и работающих подруливающих устройствах в режиме динамического позиционирования), что формально служит иллюстрацией согласования принципов непротиворечивого проектирования сложной техники.

Малые инерционные характеристики короткого гребного вала с электродвигателем позволяют применить автоматическую защиту гребных винтов при возникновении ударных нагрузок при штормовом оголении лопастей, при плавании во льдах, и при необходимости позиционирования судна для удержания кормовой аппарели у берегового уреза без специально оснащенных слипов или десантных причалов.

Единое машинно-котельное и электрогенераторное отделение позволит объединить все энергетические ресурсы под контролем еди-

ного автоматического центра управления в непосредственной близости к жилым, бытовым и вспомогательным помещениям в зоне обитания экипажа – в носовой оконечности корабля.

В водонепроницаемом корпусе под верхней палубой располагается большая часть жилых помещений: с каютами для экипажа на баке и для пассажиров - вдоль автомобильного ангара и в комфортабельной кормовой надстройке.

Плановая пассажировместимость 250 человек обеспечивается каютами 1-2 класса, а также сидячими местами 3 класса в общих салонах.

Под главной палубой располагаются вспомогательные, хозяйственные и грузовые отсеки – трюма, разделенные водонепроницаемыми переборками в соответствии с требованиями Регистра России.

8. Б. Архитектурное построение пассажирского судна

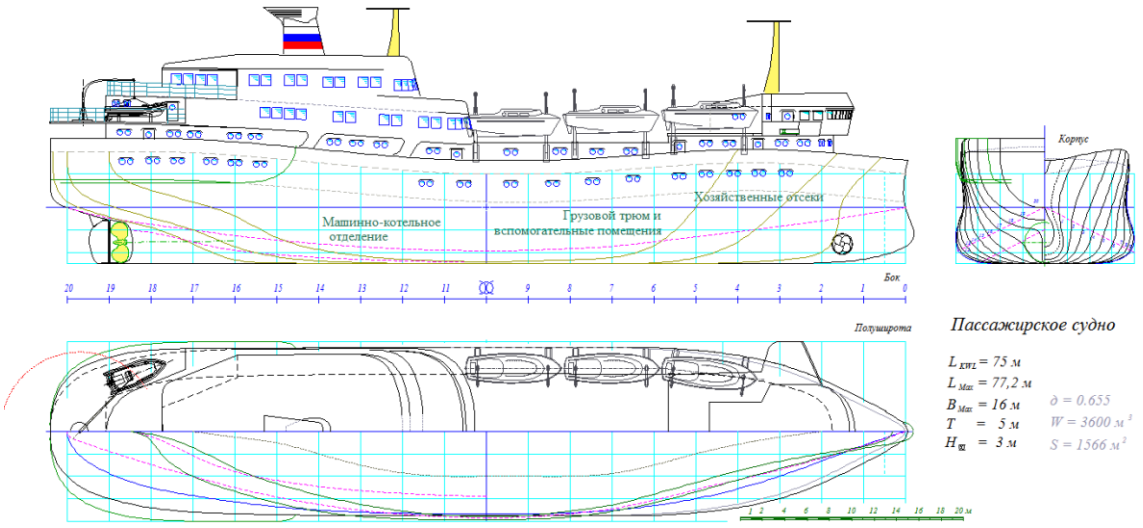


Рис. 76. Пассажирское судно.

В случае чисто пассажирского судна (рис.76) появляется возможность устройства на борту комфортабельных общественных помещений, рестораном и салонов для отдыха. Значительно снижается стоимость постройки и эксплуатации судна, возрастает стабильность работы регулярных пассажирских линий. В случае уменьшения ширины корпуса пассажирского судна, что вполне возможно при общем сокращении эксплуатационной функциональности, существенно возрастает эффективность штормового мореплавания и возможность манев-

рирования в сложных условиях вблизи морских портов и на морских рейдах.

На борту судна без кормовой аппарели может задействоваться схема общего размещения с традиционным кормовым машинно-котельным отделением.

Проект пассажирского судна являет пример внешнего облика судна, для которого безопасность штормового плавания с остановленными машинами обеспечивается специальной формой корпуса и архитектурой палубных надстроек.

Заключительные замечания о достижениях эволюционно-обоснованного проектирования новых кораблей и судов

Аналитические и экспериментальные исследования штормовой мореходности кораблей и судов различного назначения привели к построению ключевых положений непротиворечивого проектирования общекорабельной архитектуры и обводов формы корпуса, способствующих повышенной ходкости, плавности качки и безопасности плавания в условиях интенсивного штормового волнения.

Испытания новых проектов судов выполнялись в опытовом бассейне Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. В планировании экспериментов учитывалась необходимость сопоставления данных с испытаниями модели судна с малыми моментами инерции действующей ватерлинии (МИДВ-85) и модели быстроходного судна 60-серии с коэффициентом общей полноты: δ=0,572, проведенными ранее в опытовом бассейне Санкт-Петербургского морского технического университета под руководством проф. А. Н. Холодилина.

Свободное движение новых опытовых моделей на крупном волнении поддерживалось с помощью бортовых электродвигателей и системы телеуправления. Измерение скорости хода, бортовой и килевой качки выполнялось с цифровой радиотелеметрии. Опорные оценки ходкости выполнялись на тихой воде, затем проводились мореходные испытания на регулярном волнении.

Оценка реальных параметров волнения проводилась по видеозаписям, фиксировавшим прохождение волн по специально размеченной стенке опытового бассейна.

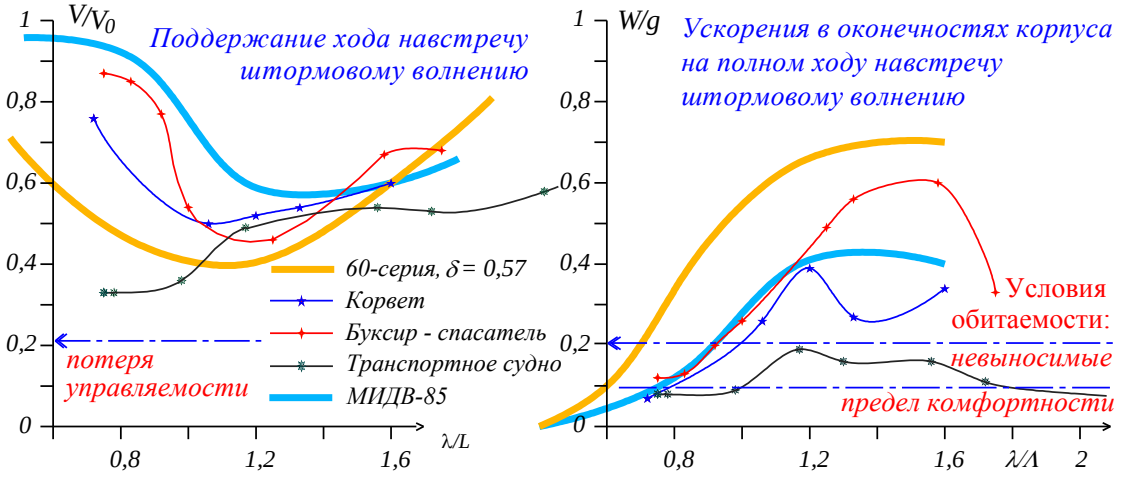


Рис. 77. Обобщенные результаты опытовых испытаний *ходкости (слева) и килевой качки (справа) моделей судов, оптимизированных для штормового плавания. Как и ожидалось, ходовые качества моделей перспективных судов оказались несколько лучшими, чем у традиционного быстроходного судна 60-серии, но худшими в сравнении с гипотетическим судном МИДВ-85. В то же время все проекты новых судов подтвердили превосходные результаты по условиям обитаемости в штормовых условиях.*

По результатам полного цикла всех мореходных испытаний на регулярном волнении (рис.77) необходимо отметить, что оценки ходкости и качки для модели МИДВ и модели судна 60-серии выполнены по вполне представительной серии опытов на кафедре теории корабля Ленинградского кораблестроительного института, откуда выбраны графики для режима полного хода: $R_X / D \approx\leq 0{,}2$ [Н/кг].

Эксперименты с самоходными моделями перспективных судов в опытовом бассейне кафедры кораблестроения Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета можно определить как оценочные. По времени испытания каждой модели не превышали одного – двух дней. Скорость хода всех моделей задавалась в двух вариантах: как максимально возможная, и при ориентировочно вдвое сниженной мощности электродвигателей. Однако, ходкость моделей на волнении в большей степени зависела от устойчивости рабо-

ты гребных винтов, значительно отличавшихся по тяговому усилию от режима движения моделей на спокойной воде.

На графиках ходкости и качки (рис.77, *слева*) специальными значками отмечены все результаты телеизмерений, которые при совместном анализе экспериментальных данных и видеозаписей признаны достоверными.

Мореходные испытания моделей судов в гравитационной системе, и особо опыт работы с телеуправляемыми моделями, позволяют сделать проектные и эксплуатационные оценки мореходных качеств испытываемых судов в сложных и штормовых условиях плавания. Важные заключения о мореходных качествах самоходных моделей судов готовились также на основе многочисленных видеозаписей в опытовом бассейне и открытом море, где испытания моделей проводились на настоящем ветровом нерегулярном волнении. Оценки мореходности могут становиться предзнаменованием морских катастроф, и потому за ними должен следовать существенный пересмотр проекта обводов или общекорабельной архитектуры судна, либо – их обязательное включение в наставления мореплавателям по недопущению опасных режимов штормового плавания действующих кораблей и судов. Например:

– Модель судна 60-серии на предельно малом ходу навстречу волне высотой в половину осадки и длиной равной длине корпуса ушла с курса и вырвала коромысло тросового ромба гравитационной упряжки. *Корпус нуждается в штормовом подрезе форштевня для возможности свободного рыскания на волне, а также в уменьшении надводного объема бака для исключения интенсивной килевой качки*;

– Самоходные модели судов теряют управляемость и приводятся на курс лагом к волне, если скорость хода снижается до 20 % от ходкости на спокойной воде. *Корпус судна не должен испытывать сильных ударов волн и слеминга на скорости хода порядка 30 % от исходной на тихой воде, что достигается уменьшением высоты борта и уменьшением моментов инерции площади действующей ватерлинии в активном диапазоне штормовых осадок*;

– Оптимизированные для штормового плавания модели судов показывают значительное уменьшение килевой качки на полных ходах в условиях интенсивного волнения. *Судоводителям следует выбирать режимы штормового плавания на повышенных скоростях хода для снижения качки и повышения комфортности обитания на борту судна*;

– Все испытанные самоходные модели судов теряют управляемость на малых ходах при движении по крупной волне, и обретают опасную способность к захвату корпуса волной и стремительной циркуляции (брочингу). *Судоводителям не следует снижать ход при движении по волне, если же мощностей главных машин недостаточно для поддержания управляемости и уверенного движения по волне, то следует встать на курс лагом, вразрез или навстречу штормовой волне для восстановления управляемости.*

В мореходных испытаниях модели транспортного судна и патрульного корабля обнаружено практически полное гашение бортовой качки на любом курсе на ходу и без хода [3], что означает компенсацию внешнего силового воздействия со стороны морского волнения. Однако на циркуляции или под действием ветра эти модели проявляют вполне заметный крен. Это соответствует аналитическому выводу о следствиях компенсации главных возмущающих сил, в результате чего судно становится чувствительным к инородным нелинейным эффектам, которые в традиционном проектировании считаются несущественными.

Как вариант компенсации этих относительно слабых возмущений, предлагается к использованию унифицированное устройство активной стабилизации остаточной килевой и бортовой качки оптимизированного корпуса (рис.77, *справа*), согласованное в действии с пассивным механизмом аварийного поддержания штормового хода и управляемости после остановки главных машин. Возможность полезного использования такого крыльевого устройства в штатном и аварийном режимах плавания служит показательным примером непротиворечивого проектирования сложной морской техники.

V. Морское дело и научно-техническое творчество юношества

Морское дело – это особая дисциплина, передаваемая из поколения в поколение профессиональными судоводителями на лекциях и практических занятиях курсантам судоводительских отделений мореходных училищ. Особенности проектирования и мореходные качества различных кораблей и судов, детальный анализ процессов взаимодействия корпуса и движителей, отработка до автоматизма вопросов управления судном в сложных и штормовых условиях плавания, его маневрирование при швартовках в открытом море и при прохождении узкостей, так же как и множество других интереснейших морских задач, самым тщательным образом изучаются в курсе морского дела, опирающемся на практический опыт мореплавания – хорошую морскую практику.



Рис. 1. Портрет императора Петра I *(худ. В. Крюков). Преобразования Петра Великого привели к быстрому развитию морского дела, инженерного образования и наукоемкой промышленности*

Непременным требованием к будущему мореплавателю является как теоретическое, так и практическое освоение азов морского дела, подтверждаемое подробнейшими отчетами об учебной и производственной практике на палубе и ходовом мостике реальных судов. Такая практика подготовки мореходов берет свое начало со времен Петра I, посылавшего будущих российских морских офицеров на выучку на кораблях европейских стран. Ныне морская практика входит и в академические программы подготовки корабельных инженеров, что является важной составляющей учебно-

исследовательской работы студентов-корабелов. Только в дальних штормовых походах происходит гармоничное соединение теоретических знаний и практических навыков морских наук, что будущим капитанам и морским инженерам вознаграждается неизгладимыми впечатлениями от первых зачетных месяцев океанского плавценза.

Реальное морское дело, развитие дальнего мореходства и кораблестроения, возможны только с опорой на беззаветно преданных флоту моряков и корабельных инженеров, способных достойно переносить все тяготы морской службы и при этом непрерывно изучать морские законы и совершенствовать теоретические основы корабельных наук. Поддержка флотских династий и подготовка молодых профессионалов морского дела невозможна без популяризации интереснейших, по сути, морских наук, без активного вовлечения молодежи в морские клубы и судомодельные лаборатории, в которых зарождается как романтика дальних походов, так и умение обращать сложнейшие проблемы в увлекательное научно-техническое творчество.

Становление Русского флота и кораблестроения и последовавшее ускоренное развитие наукоемких промышленных технологий по европейскому образцу стали возможны после учреждения по Указу Петра I от 14 января 1701 года школы «Математических и навигацких, то есть мореходных хитростно искусств учения». В школу был приглашен выделявшийся талантом, знаниями и добрыми человеческими качествами Леонтий Филиппович Магницкий, выпускник Московской славяно-греко-латинской академии, где он составил учебник «Арифметика, сиречь наука численная и т.д.». Именно эта школа дала государству первых русских морских офицеров, а также собственных инженеров, архитекторов, гидрографов и геодезистов, уже первые ее выпускники прославили Россию своими достижениями в науках и ратных делах.

Тогда же «*... ради обучения мудролюбивых российских отроков и всякого чина и возраста людей*» Петр I вменил в обязанности всех юношей дворянского сословия обучение грамоте, «цифири» (т.е. счету) и геометрии.

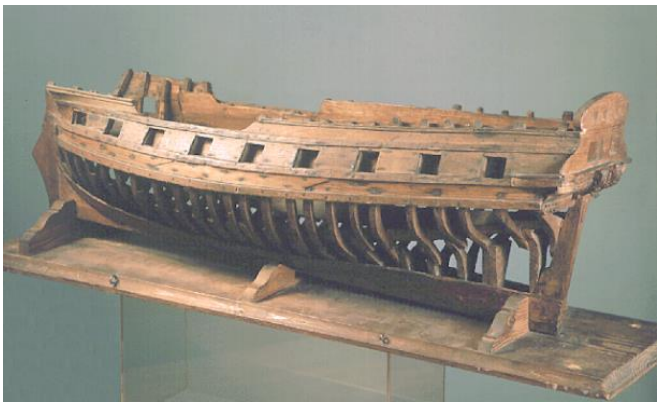


***Рис. 2. Модель корабля, сделанная Петром I по возвращении из Голландии в 1697** г. На подобных моделях кораблестроители отрабатывали конструкцию корпуса и технологические решения по стапельной сборке нового корабля. Близки по конструкции этой модели такие корабли, как «Апостол Пётр», «Апостол Павел» и другие, построенные в 1697-1702 гг. в Воронеже.*

Петр I собственным примером пропагандировал постоянную приверженность к техническому творчеству и познанию новых морских и инженерных наук, тем самым способствуя непрерывному совершенствованию научных школ и промышленности России. Он самолично проектировал новые корабли и даже изготавливал их масштабные модели, в точности воспроизводящие конструкцию и, соответственно, технологию их постройки. Изучив корабельное дело в Голландии и Англии, Петр I прочно связал российскую промышленность и кораблестроение с новейшими европейскими технологическими достижениями, введя за правило обучение молодых русских инженеров за рубежом и приглашение ведущих иностранных специалистов для работы в России.

Современные технические науки, как и морское дело, требуют еще большей интеграции в мировую науку и в будущем смогут уверенно развиваться только при условии, что новейшими техническими достижениями и старинными морскими традициями будет увлечена творческая молодежь самого раннего возраста.

О традициях развития морского и корабельного дела

В современной России сохраняются традиции Петровской эпохи, которые исторически сложились так, что ознакомление с основами морского дела и теорией корабля происходит в клубах юных моряков и судомодельных студиях, возглавляемых авторитетными флотскими

наставниками и энтузиастами корабельных наук. Важно отметить также, что изготовление точных копий моделей кораблей и использование их в спортивных соревнованиях судомоделистов вряд ли имеет отношение к праздным хобби или магии индустрии развлечений.



Рис. 3. Модель корабля с очень устойчивым на курсе и хорошо обтекаемым корпусом. *Модель оснащена гирокомпасом и авторулевым. Фото сделано на первенстве России по судомодельному спорту в классах самоходных моделей и яхт в г. Омске в 1971 г. Автор проекта корабля и его модели Владимир Лагутин, г. Сызрань*

Проведение проектных исследований в области теории и мореходности корабля, чертежные работы и полноценные конструкторские и технологические разработки по изготовлению корпуса, надстроек, дельных вещей и судовых механизмов, а зачастую и автоматизированных систем управления двигателями или парусами на действующих моделях – все это относится к минимальным навыкам юных спортсменов-судомоделистов. Конечно, для получения столь ценных знаний будущим мореплавателям приходится самостоятельно изучать основы математических, навигационных и корабельных наук, отыскивая их в морской популярной, исторической и научно-технической литературе, попутно знакомясь с историей военно-морского искусства, бытом и взаимоотношениями матросов и корабельных командиров, закладывая тем самым прочные основы для освоения морской профессии. Кропотливое ремесло и увлекательное морское творчество обычно вознаграждается встречами с авторитетными мореплавателями на спортивных состязаниях и выставках моделей судов, где юные

моряки укрепляют свое понимание особого морского языка, палубного сленга и глубинной сути настоящего морского дела.

Постройка моделей копий, особенно, авторских проектов судов, во многом свидетельствует о реальной профессиональной подготовке молодых судомоделистов. Но все же, кроме энтузиазма наставников, техническое творчество судомоделистов должно опираться на своеобразное широкопрофильное производство, которым и являются судомодельные лаборатории. В первую очередь там должны быть станочный парк для дерево- и металлообработки, электро- и радиотехнические приборные комплексы, множество ювелирного инструмента и обязательно – современное чертежно-конструкторское оборудование и морская научно-техническая библиотека. Так, например, в крупном волжском портовом городе Сызрани существовали две хорошо оснащенные судомодельные лаборатории, одна – в красивейшем старинном здании Дворца пионеров, вторая - в Доме культуры Сызранского завода тяжелого машиностроения. Необходимые для работы материально-технические условия для юных судомоделистов создавались, по-видимому, крупными промышленными предприятиями г. Сызрани, а уникальные малогабаритные электротехнические устройства для встраивания в модели судов всякой хитроумной автоматики – Сызранским военным вертолетным училищем, в виде вышедших из строя и списанных авиационных приборов, содержащих двигатели, гироскопы, электроконтроллеры, редукторы, таймеры и др.



***Рис. 4. Александр Михайлович Лагутин**, мастер спорта по судомодельному спорту, инженер-кораблестроитель, наставник юных корабелов г. Сызрани*

Но все же достаточным условием для становления судомодельного образования являются авторитетные наставники, способные собрать вокруг себя увлеченных морским делом школьников. Родоначальниками

корабельного дела в Сызрани в 70-е годы были Юрий Анатольевич Аксенов и подготовленные им молодые наставники, неоднократные чемпионы всероссийских и всесоюзных судомодельных первенств, мастера спорта Александр Михайлович и Владимир Михайлович Лагутины. Безгранично творческая атмосфера, грамотные дискуссии и множество свежей научно-технической информации о мореходстве, регулярно поступавшей в судомодельные лаборатории, позволяли успешно готовить чемпионские модели самоходных кораблей для всероссийских и международных соревнований, а попутно проводить начальную профессиональную подготовку школьников – будущих моряков и корабелов. Кстати, в те же годы в СССР отмечался расцвет научно-просветительской литературы по военно-техническим видам спорта, а многочисленные и разнообразные клубы юных техников демонстрировали истинные чудеса научно-технического творчества школьников.

Постоянное обсуждение мореходности океанского флота в судомодельной лаборатории и на судомодельных первенствах, создание и опытовые испытания разномасштабных моделей новых проектов кораблей и судов, как и следовало ожидать, привели к зарождению крепкого кораблестроительного консерватизма, основанного на уважении к авторитету корабелов всех исторических эпох, всех стран и народов. К тому же огромное водохранилище Саратовской гидроэлектростанции, разлившееся у побережья г. Сызрани, делало чрезвычайно актуальным практическое изучение вопросов безопасности штормового плавания для местных речников и рыбаков, которые при усилении ветра рисковали не совладать с огромными и очень крутыми гребнями речных волн. А потому следует признать, что волжские корабелы-наставники Александр и Владимир Лагутины, так же как и старейшина судомоделизма Юрий Анатольевич Аксенов, являются равноправными авторами главных идей, связанных с систематизацией мореходных свойств исторического флота и получением ключевых проектных решений, показанных в настоящей книге.

Конечно, не всех воспитанников юношеских морских клубов судьба накрепко связывает с морским делом, но всем им предначерта-

но стать профессионалами своих инженерных наук и настоящими творческими личностями.

Особенности судомодельного спорта в России

Важной вехой в истории российского судомоделизма является первое всесоюзное соревнование, проведенное Осоавиахимом (*Общество содействия обороне, авиационному и химическому строительству*) в качестве особого военно-технического вида спорта в июне-июле 1940 года. Великая Отечественная война отсрочила объединение судомоделистов до 1949 года, когда их всесоюзные встречи стали ежегодными, а в 1963 году судомодельный спорт был включен в Единую спортивную классификацию. Тогда же была создана Федерация судомодельного спорта СССР, работа которой поддерживалась Центральным комитетом Добровольного общества содействия армии, авиации и флоту (ДОСААФ).



***Рис. 5. Герб** ФССР*

До 1967 года советские судомоделисты, объединяемые ДОСААФ, руководствовались традициями постройки моделей судов и проведения соревнований спортсменов-судомоделистов, которые несколько отличались от международных правил NAVIGA. А именно, в те годы всячески приветствовалось представление моделей кораблей и судов по оригинальным проектам и чертежам юных авторов, что превращало судомоделизм в реальное морское научно-техническое творчество, а соревнования судомоделистов – в конкурс морской грамотности и реальные опытовые испытания мореходности новых моделей кораблей и судов. Не возбранялось также использование на самоходных моделях всевозможных устройств для удержания их на прямом курсе, что давало возможность развития изобретательского потенциала школьников, оснащавших свои малые корабли изрядно сложными механизмами для автоматического управления рулями, двигателями и стабилизаторами корпуса – успокоителями качки.

Любопытно, что Центральный морской клуб ДОСААФ централизованно распространял чертежи гипотетических кораблей, таких как сторожевой корабль «Марс», эсминец «Сатурн», крейсер «Юпитер» и даже авианосец (*без названия*), у которых на теоретических чертежах предусмотрительно было занижено отношение ширины к осадке (B/T) до величины порядка 2–2,5, что соответствует старинным парусникам и заметно улучшает мореходность моделей на волнении. Последнее было достаточно важно, так как спортивные соревнования не отменялись в случае усиления ветра и волнения, а юные судомоделисты воочию наблюдали катастрофы моделей, связанные с их недостаточной мореходностью. Нередко на одной и той же акватории проводились испытания самоходных моделей с механическими двигателями и гонки парусных яхт.

Оценка спортивных моделей по старым российским правилам велась по сорокабальной шкале, в которой по десять баллов начислялось: 1 – за знание морского дела и грамотность разработки проекта корабля; 2 – за качество и масштабность изготовления модели; 3 – за устойчивость на курсе на ходовых испытаниях, проводимых при любом состоянии волнения и ветра; 4 – за точное соблюдение масштабной скорости хода на этих испытаниях.

Обычно ходовая модель готовится в течение одного года, что позволяет школьникам выдержать несколько экзаменов на морскую грамотность проектирования и изготовления новых кораблей, провести их мореходные испытания, а также пронаблюдать за мореходными качествами множества других моделей судов и убедиться в добротности проектов моделей-победителей и множества реальных кораблей и судов. Модели плохих проектов кораблей проигрывали соревнования, а юный корабел получал необходимый опыт, чтобы должным образом воспринять добрые наставления учителей и в будущем не растрачивать свои силы и чужой труд на необоснованное изобретательство в дорогостоящем реальном кораблестроении.



***Рис. 6. Модели кораблей** и судов юных судомоделистов подготовлены к стендовой оценке на соревнованиях Сахалинских школьников*

В соответствии с международными правилами NAVIGA авторские проекты новых улучшенных или нетрадиционных кораблей больше не приветствовались, а в оснастке самоходных моделей появились запреты на использование гироскопов, стабилизаторов качки и других автоматических устройств, оказывающих влияние на устойчивость на курсе и улучшающих мореходные свойства самоходных моделей (*юным авторам новых проектов кораблей предложили стремиться к владению красивыми игрушками, а морское научное творчество и постижение мореходного искусства подменили освоением кропотливого технического мастерства моделиста-копировщика*).

Спортивные модели судов разделили на категории, группы и классы. К примеру, в категории E классифицируются самоходные модели кораблей, судов и подводных лодок, проходящих как стендовые конкурсы, так и ходовые испытания. В этой же категории, в классе X, проводятся соревнования самоходных моделей свободной конструкции, которые никак не оцениваются на стенде, и потому к ним не предъявляется требований по морской грамотности проектирования реальных кораблей, что подменяет полноценное инженерно-техническое творчество простым стремлением к прямоходности модели любыми средствами.

В категории F участвуют радиоуправляемые модели судов, также разделяющиеся на классы со стендовыми конкурсами на глубину и качество копирования существующих кораблей и судов, и оригинальные водоплавающие конструкции (FX и FSR), не проходящие стендо-

вых оценок и не являющиеся моделями существующих или перспективных судов.



Рис. 7. Внешне одинаковые яхты *на старте (слева) расходятся по самым неожиданным для юных спортсменов курсам. Яхта победителя (справа) должна не только взять ветер, но и строго удерживаться на заданном курсе или уверенно лавировать на встречных ветрах*

Особая морская школа для судомоделистов представляется гоночными парусными яхтами, относящимися к категории S – sailing, а также моделями – копиями радиоуправляемых парусных кораблей из категории F. На различные классы гоночных яхт накладываются геометрические ограничения, в основном связывающие размеры их корпуса и площади парусов. Техническая инициатива по совершенствованию парусного вооружения и использованию автоматического управления рулем и парусами на моделях яхт особо не ограничивается, что превращает спортивные выступления яхтсменов в увлекательное состязание оригинальных парусных оснасток, бортовой автоматики и опыта управления яхтой как на слабых, так и на сильных ветрах, в том числе и на серьезном ветровом волнении.

Участие сахалинских школьников в опытовых испытаниях моделей судов

Южно-Сахалинский Дворец детского и юношеского творчества (ДД(ю)Т, ранее Дворец пионеров) имеет добрую историю и потенциал для поддержания и развития судомодельного спорта, что позволило ему сохранить столь актуальное для Сахалина научно-техническое

творчество школьников до наших дней. Судомодельная лаборатория имеет большие и светлые помещения, оснащена всеми необходимыми дерево- и металлообрабатывающими станками, там изначально был установлен довольно крупный опытовый бассейн. Несмотря на значительный интерес сахалинских школьников к морскому техническому творчеству и судомодельному спорту, все же приходится отмечать острейший дефицит в методической и технической поддержке существующих судомодельных студий. Непрерывная работа станков и другого оборудования нуждается в постоянном техническом обслуживании, требуется регулярное обновление инвентаря, настройка и ремонт радио- и электрооборудования, а также своевременное пополнение расходных материалов для изготовления и оснастки новых моделей судов. Для поддержания минимальных требований современности к проведению проектно-конструкторских работ крайне желательно приобщение юных судомоделистов к компьютерной подготовке чертежей, самостоятельному проведению расчетов по теории корабля, ходкости и мореходности их новых авторских моделей.



Рис. 8. Постройка пяти моделей судов *выполнена по технологическим схемам С.К. Полищука (слева). Рядом с ним руководитель судомодельной студии В.Ю. Каликин и судомоделисты Лаида Кушнарева, Александр Батурин и Александр Бояркин, участники учебно-исследовательских работ.*

Учащиеся судомодельной студии приняли самое активное участие в изготовлении моделей и самостоятельно проводили все опытовые испытания в условиях сильного ветра и интенсивного волнения на озере Тунайча. В соответствии с правилами NAVIGA, все чертежи перспективных судов повышенной штормовой мореходности официально представлялись в качестве перспективных «проектов» новых кораблей и судов.

Пока большие модели готовились к плаванию, первой на штормовой акватории оказалась маленькая самоходная модель линкора «Бисмарк» (*М 1:350, автор Семен Храмушин*), показавшая хороший пример штормовой мореходности. Корпус «Бисмарка» свободно рассекал очень крупные волны, уверенно и без видимой потери хода двигался вперед, в движении хорошо удерживал верхнюю палубу параллельно поверхности волны, испытывая преимущественно вертикальную качку.

Спуск на воду основных опытовых моделей начинался с наставлений о методах обеспечения хорошей штормовой мореходности реального корабля и о необходимости придерживаться тех же условий загрузки моделей балластом, чтобы параметры ходкости и качки соответствовали условиям плавания прототипа.

Дело в том, что первое знакомство с устройством новых моделей подтверждало своеобразную отчужденность современных судомоделистов от знаний реального морского дела, от практики приобщения молодежи к морским традициям и познанию хорошей морской практики, что, в принципе, соответствует ориентации NAVIGA на достижение спортивных результатов любыми средствами. Действительно, у многих спортсменов-судомоделистов существует предубеждение о необходимости размещения балласта как можно ниже и как можно дальше от мидель-шпангоута. В результате основной балласт модели корабля *(свинец)* был размещен в носовом бульбе ниже киля. Огромная остойчивость и повышенная инерционность модели на килевой качке довольно быстро привела ее к затоплению, что произошло в свободном дрейфе после внештатной остановки двигателей.

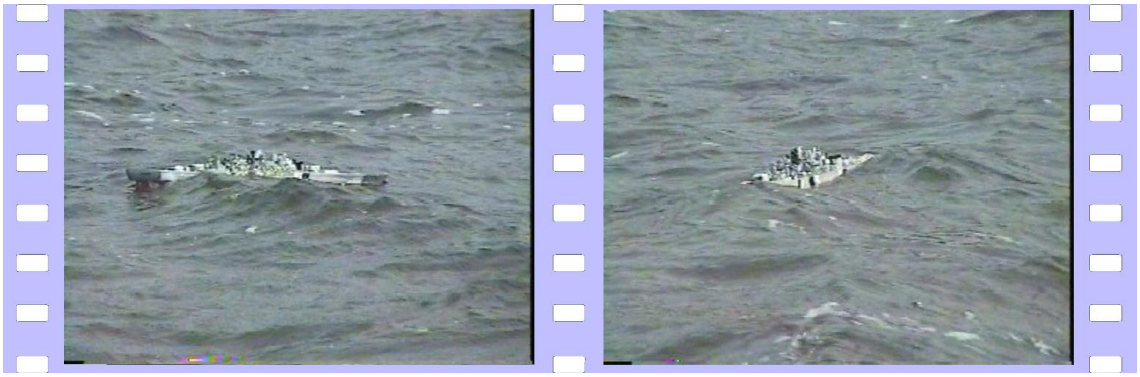


Рис. 9. Пробный выход маленькой модели линкора «Бисмарк» на взволнованную поверхность озера Тунайча*. Демонстрируя хорошую штормовую мореходность корабля, модель все же напомнила о необходимости поддержания безопасности ее штормового плавания*

Модель рыболовного траулера полностью балластировалась на озере Тунайча после ее спуска на воду. Балласт был распределен равномерно вдоль всего корпуса, однако для безопасности первых испытаний поперечная остойчивость устанавливалась предельно высокой, что привело к олчень резкой бортовой качке на естественном ветровом волнении. Радиоуправляемая модель траулера вышла на волну своим ходом и позволила сделать первые фото- и видеосъемки, удачно прокомментированные в первой главе этой книги. Корпус траулера имел обводы такие же, как у крупных военных кораблей конца XIX – начала XX веков, и наблюдение за его плаванием на волнении показывало плавность хода и умеренное воздействие на траулер крупных морских волн, что отмечало его превосходную штормовую мореходность.

Затем сахалинская команда судомоделистов участвовала в выездных юношеских соревнованиях на первенстве Хабаровского края в г. Комсомольске-на-Амуре. Путешествие на материк проходило на пароме «Сахалин», и для юных спортсменов это был первый выход в открытое море на крупном судне. Надо признать, что комсомольчане подготовили краевое первенство юных судомоделистов на высоком уровне, что подтверждало жизнеспособность морского технического творчества на Дальнем Востоке России. Было представлено довольно много высококачественных моделей кораблей, судов и подводных лодок, изготовленных дальневосточными школьниками из Комсомоль-

ска-на-Амуре, Хабаровска, Амурска и других дальневосточных городов. Такая поездка, конечно же, была необходима для учащихся сахалинских судомодельных студий и крайне полезна для их руководителей, пока еще не имеющих высоких спортивных званий в этом увлекательном военно-техническом виде спорта.

В Комсомольске-на-Амуре впервые была спущена на воду и начала цикл сравнительных испытаний модель патрульно-гидрографического корвета. Узкий корпус этой модели, спроектированный по аналогии со старинными миноносцами, сразу же показал все сложности в обеспечении начальной остойчивости этого быстроходного корабля. При балластировке весь груз был равномерно распределен вдоль корпуса, а поперечная остойчивость модели с тяжелыми надстройками получалась почти нулевой, что придавало большую плавность бортовой качки.



Рис. 10. На старте модель патрульно-гидрографического корабля. *Даже в идеальных условиях на соревнованиях судомоделистов опытовые модели подвержены дрейфовым течениям и воздействию волнения и ветра, отчего ключом к успеху также являются штормовые мореходные качества модели корабля.*

В испытаниях модель во многом подтверждала высокие мореходные качества старинных миноносцев на волнении, а заваленный в районе ватерлинии борт придавал ей хороший запас остойчивости даже при отрицательной метацентрической высоте. Однако, под воздействием сильного бокового ветра и шквалов, налетавших на открытый

водоем модель кренилась и теряла устойчивость на курсе, при этом она всегда стремилась привестись навстречу к ветру (рис. 10). Проблема прояснилась довольно быстро – устойчивости на штормовом курсе мешал носовой бульб, который искривлял линию корпуса при накренениях, а на большой скорости хода переносил далеко в нос центр бокового гидродинамического сопротивления, что при средней палубной надстройке создавало дополнительный момент для приведения модели навстречу ветру.

Но все же каких-либо неустранимых недостатков или неприемлемых мореходных свойств за моделями корвета и траулера не замечалось, что в первую очередь подтверждало высокое качество проектирования обводов быстроходных кораблей в конце XIX – начале XX веков, как наиболее близких прототипов новых нетрадиционных обводов корпуса, успешно опробованных сахалинскими судомоделистами.

Особо значимым для сахалинских школьников мероприятием стало посещение опытового бассейна кафедры кораблестроения Государственного технического университета в г. Комсомольске-на-Амуре. Руководитель бассейна, к.т.н. Н.А. Мытник показал сахалинской команде устройство бассейна и организовал запуск всех трех самоходных моделей. Юные корабелы смогли опробовать ходкость и управляемость своих моделей на тихой воде, а затем самостоятельно оценить сложности штормового судовождения в условиях интенсивного встречного и попутного волнения.

При испытаниях на волнении модели корвета было проявлено важное свойство старинных парусных кораблей, теоретический чертеж корпуса которых вписывается в геометрическую окружность. А именно, когда корвет, обладающий очень малой начальной остойчивостью, двигался навстречу крупной волне, резким рывком нитиповодка ему было изменено направление движения, отчего на крутой циркуляции и под ударами встречных волн модель полностью завалилась на правый борт, однако, обладая большим запасом остойчивости на больших углах крена, выйдя из-под волны, модель встала на ровный киль и, практически не раскачиваясь, продолжила быстрое сво-

бодное движение косым курсом навстречу волнению. Незапланированный жесткий эксперимент моделью подтверждал, что старинные корабли обладали очень высокой штормовой надежностью, им не грозило опрокидывание, даже когда резервы динамической остойчивости поддерживались только прочностью стоячего такелажа и плавучестью парусного рангоута при мачтах, положенных под ударами ветра и волн на поверхность воды.



Рис. 11. Модель универсального транспортного судна и модель патрульно-гидрографического *корабля на достроечном столе. Устанавливается аппаратура радиоуправления и тестируются измерительные датчики для регистрации штормовой качки и ходкости моделей, имеющих реконструированные исторические обводы корпусов.*

В течение лета и осени все пять радиоуправляемых моделей (рис. 11) многократно выводились на интенсивное волнение на озере Тунайча, знакомя молодых исследователей как с мореходными свойствами различных кораблей, так и с особенностями судовождения в условиях интенсивного волнения и сильного ветра. Управляя моделями, проходившими различными курсами и маневрировавшими на сильном ветру среди огромных, по модельным меркам, штормовых волн, сахалинские школьники на собственном опыте смогли убедиться в существовании особого искусства штормового судовождения, в ответственности моряков за безопасность плавания своих судов, а также в необходимости глубокой проектно-технической проработки обводов корпуса, его рулей и движителей.

Учебно-исследовательские работы на озере Тунайча в целом подтверждали хорошие мореходные качества новых моделей, и потому было принято решение о проведении испытаний всех моделей с нетрадиционными обводами корпуса в опытовом бассейне кафедры кораблестроения Комсомольского-на-Амуре Государственного технического университета.

Пока с новыми экспериментальными моделями судов занимались сахалинские школьники, были подготовлены два комплекта телеметрической аппаратуры, позволявшей по радиоканалу непрерывно доставлять на берег данные о скорости хода, углах крена и дифферента свободно плавающих моделей.

В экспериментальных и теоретических исследованиях по открытой на Сахалине тематике изучения штормовой мореходности флота принял участие также и Морской институт Дальневосточного государственного технического университета, дополнив тем самым научную группу для проведения мореходных испытаний в г. Комсомольске-на-Амуре.

Об исторической морской практике в литературе

В заключение хотелось бы снова коснуться примеров из реальной морской практики. Ответственность за действия ходовой вахты всегда принимает на себя капитан, что заставляет его неотлучно присутствовать на ходовом мостике в сложных условиях плавания. В племени капитанов есть немало блестящих писателей. Как помнится, на одном из первых построений курсантов-первокурсников судоводительского отделения Калининградской мореходки, капитан III ранга Иван Иванович Беликов объявил, что каждый из будущих морских офицеров обязан прочитать книги Леонида Соболева «Капитальный ремонт» и Алистера Маклина «Корабль ее величества Улисс». В этих вполне серьезных книгах неплохо показывается штормовой характер морской службы в России и в Англии, и воспевается высокий морской профессионализм.

Кратко рассмотрим действия опытного капитана в штормовых условиях плавания на парусно-моторном судне, особо не адаптированном к ураганным ветрам и штормам япономорских мелководий. Штормующий корабль, без страха перед критикой, замечательно описывает в главе «Снежный шторм» (книга «Под парусами через два океана») капитан марсельной шхуны «Коралл» Борис Дмитриевич Шанько [1954 г.]. Кстати, показывая изрядную капитанскую лихость в борьбе с непреодолимой стихией. При восьмибальном встречном ветре шхуна «Коралл» лавирует под зарифленными парусами в Японском море, удаляясь на север от побережья Кореи. К полуночи ветер достигает девятибалльной силы и капитан отдает команду лечь в дрейф под штормовыми парусами, т.е. лагом к волне (*обычное затягивание в принятии решения, объясняемое нежеланием капитанов двигаться обратным курсом*). Однако ветер усиливается, резкая бортовая качка в свободном дрейфе становится опасной, и шхуна «Коралл» запускает машину и выводится на курс активного хода по волне, одновременно подготавливаясь к постановке на плавучий якорь (*на курсе по волне судно раскачивается очень плавно*). Шторм усиливается.

Штормование с ходом по волне требует особых навыков рулевого и, о чем говорилось в первых главах книги, не является абсолютно безопасным, так как судно может быть захвачено волной и на крутой циркуляции опрокинуто. Б.Д. Шанько опять не спешит с ночным маневрированием для постановки плавучего якоря (*якорь нельзя завести за корму без риска намотки тросов на винт*) и вместе с помощником всю ночь лично руководит работой двух рулевых, «… чтобы каждую новую приближающуюся волну судно встретило возможно ближе к положению прямо с кормы… Иногда напор воды на перо руля настолько силен, что штурвал стремится вырваться из рук» (*капитан предвычисляет опасную динамику ближайших штормовых волн и, минимизируя их боковые удары, старается сохранить управляемость и уберечь судно от брочинга*).

После рассвета становятся видимыми дальние гребни штормовых волн и, выбрав момент, судно дает полный ход и начинает разворот на обратный курс носом на волну. Но только судно встает лагом к волне, как «высоко над бортом, увенчанный гребнем, уже встает могучий вал. С грохотом и плеском опрокидывается он на палубу, мгновенно наполняя ее водой и круто креня «Коралл» вправо. Крен быстро увеличивается, и подветренный борт совершенно скрывается в воде. Но вал проходит, и «Коралл» сначала медленно, а затем все быстрее и быстрее начинает вставать и, дойдя до прямого положения, стремительно падает на левый борт под вырастающую над ним следующую пенную громаду. Положение становится критическим … каждое мгновение может принести гибель» (*широкобортная шхуна с малой осадкой и низко наклоненным вперед форштевнем вынуждена иметь огромную начальную остойчивость, что приводит к резкой бортовой и килевой качке*).



Рис. 12. «Снежный шторм»
(иллюстрация Б.Д. Шанько из книги «Под парусами через два океана»).

Спасение приносит быстрая постановка кормового паруса – глухо зарифленной бизани. «Могучий толчок ветра, и корма, быстро разворачиваясь, приводит судно носом к волне». Однако в движении навстречу волне усиливается резкая килевая качка. Шхуна в движении вперед высоко задирает нос и, теряя ход и управляемость, глубоко зарывается под встречные волны, принимая на носовую палубу огромные потоки воды, теряет остойчивость и сильно рыскает, пытаясь за-

валиться под волну. (*Сильный развал носовых ветвей шпангоутов и низко склоненный вперед форштевень не позволяют удерживаться на курсе носом на волну. На малом ходу судно не выгребает вперед и плохо управляется, а увеличение хода приводит к взлетам корпуса на гребнях волн, чередующихся со слемингом и глубокими заныриваниями бака под встречные волны).*

Капитан отмечает, что удержать судно на курсе навстречу волнам возможно только под бизанью, однако при очередном рыскании под ударами волн, на шквальном ветре бизань разрывается в клочья. (*Парус не может долго работать в качестве жесткого флюгера*). К этому моменту палубная команда успевает поставить плавучий якорь, но и он не приносит желанного режима безопасного штормования. Внешняя архитектура и обводы корпуса шхуны «Коралл» довольно далеки от древних прототипов, подобных всепогодным галионам. Без высокой парусящей кормовой надстройки, без рулевых весел и с остановленной машиной «Коралл» сильно рыскает и часто попадает под бортовые удары волн. (*Яркое свидетельство того, что клиперский нос шхуны полностью лишает ее возможности безопасного штормования даже при постановке плавучего якоря, и не позволяет удержаться носом на волну при исправно работающих механических движителях*).

«Коралл» снова запускает машину и дает ход вперед, чтобы перенести плавучий якорь за корму и вернуться к режиму активного штормования по волне, удерживаясь на курсе силами главных двигателей (*плавучий якорь теперь просто замедляет скорость штормового хода*). За 33 часа штормового дрейфа, шхуну снесло к югу более чем на 100 миль в сторону корейского берега и Цусимского пролива. Испытав все режимы штормования, капитан запрашивает помощи у проходящих мимо крупных судов с более мощными двигателями. Пароход «Десна» сближается со штормующим «Кораллом», подает на плавающей бочке проводник и буксир, который закрепляется к якорной цепи «Коралла». Так, уже в видимости острова Цусима и испытавшего все методы штормового маневрирования, парусную шхуну наконец-то, выводят из опасной для плавания близбереговой аквато-

рии (*В глубоком открытом море динамика штормовых волн вполне прогнозируема и опытные капитаны всегда находят способы безопасного штормового плавания, однако на мелководьях и вблизи побережья опасность непредсказуемого и сокрушительного удара волны-убийцы многократно возрастает*).

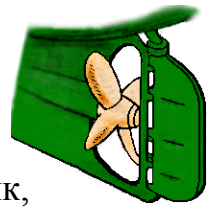


Рис. 13. *С наступлением дальневосточной осени, когда в потеплевших водах вблизи побережья появилось множество водорослей, пять из шести радиоуправляемых моделей в последний раз вышли на озеро Тунайча для мореходных экспериментов с участием сахалинских школьников - авторов моделей с корпусами повышенной штормовой мореходности (модель пассажирского судна с относительно малой осадкой и высокой кормовой надстройкой, к сожалению, и поныне не готова к испытаниям)*

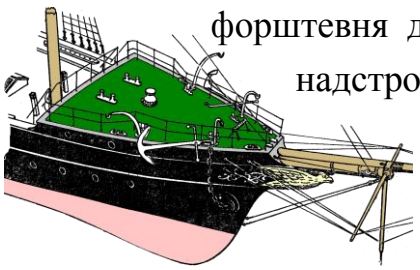
Для современных моряков нет ничего удивительного в беспристрастном капитанском повествовании, многие суда среднего водоизмещения попадают в более серьезные переделки, обладая худшей, чем у шхуны «Коралл» штормовой мореходностью. Сахалинским же школьникам, проводившим штормовые эксперименты с оптимизированными моделями судов на озере Тунайча, не довелось почувствовать тех сложностей, с которыми столкнулся в штормовом маневрировании капитан Б.Д. Шанько. У приготовленной для подобных маневров модели традиционного корабля, к сожалению, не выдерживали двигатели и рулевые машинки, останавливавшиеся при первой встрече с резкой качкой, заливаемостью и проникновением в корпус соленой воды.

Поиску путей сближения молодого поколения с морем и лучшему взаимопониманию между будущими моряками и корабелами посвящена эта книга. Именно поэтому в книге не выхолащивались фундаментальные математические основы современного кораблестроения, как и не приукрашивалось реальное морское дело беспечной романтичностью. Слишком много на море нерешенных теоретических задач, слишком требовательно оно к профессионализму живущих с ним мореплавателей. Как утверждалось в самом начале книги, развитие реального морского дела всегда способствует взаимопониманию между людьми и развитию созидательного творчества в самых сложных областях человеческих знаний – гидромеханике, навигации и других фундаментальных науках о Земле и Море.

Морские и кораблестроительные термины



Ахтерштевень – элемент набора судна: открытая или замкнутая стальная рама в кормовой оконечности, являющаяся продолжением киля. Через ахтерштевень проходят баллер руля и гребной вал. Кормовой плавник, образуемый ахтерштевнем, выравнивает поток воды из-под днища корабля, что способствует сохранению управляемости при плавании на крупном волнении.



Бак корабельный: 1 – носовая часть верхней палубы, идущая от форштевня до фок-мачты или носовой надстройки; 2 – надстройка судна в носовой части, доходящая до форштевня. На палубе бака располагаются якорное и швартовные устройства, которые редко используются экипажем при плавании в штормовых условиях. Высокий бак защищает носовую палубу от заливаемости при ходе на слабом или умеренном волнении. При встрече с крупной волной полный бак способствует развитию резкой и интенсивной продольной качки, глубокой зарываемости корпуса под встречную волну, а также возникновению опасности нарушения продольной прочности удлиненных корпусов кораблей.

Бимсы – поперечные балки, связывающие шпангоуты и служащие для скрепления бортов судна. На бимсы настилается палуба.

Буксирный гак – служит для крепления буксирного троса и быстрой его отдачи. В качестве буксирного гака могут применяться гаки, глаголь-гаки как обычные, так и снабженные амортизаторами (смягчают рывки, что уменьшает вероятность обрыва троса). В штормовых условиях с аварийного судна на трос буксира заводятся якорные цепи, что позволяет использовать в качестве амортизаторов погруженные под воду якоря. На спасательных судах вместо гаков используются буксирные лебедки, которые автоматически регулируют длину и натяжение буксирного троса.



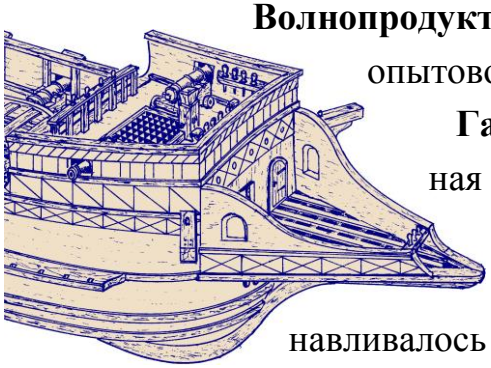
Бульб судна – каплевидное обтекаемое утолщение корпуса в носовой подводной оконечности судна, снижающее волновое сопротивления при движении на тихой воде. Большой по размерам бульб способен жестко противостоять рысканию носовой части корпуса в штормовых условиях, что заметно ухудшает управляемость, а на косых курсах относительно волнения приводит к сильным ударам гребней волн о носовую скулу корпуса.



Бушприт – горизонтальный или наклонный брус, выдающийся вперед над форштевнем парусного судна. Служит для вынесения вперед косых парусов (кливеров и стакселей) с целью смещения вперед общего центра парусности для приведения его на одну вертикаль с центром бокового гидродинамического сопротивления корпуса.

Ватервейс – 1) брусья деревянного настила палубы, прилегающие к борту по всей длине корабля, обеспечивающие прочность и герметичность соединения палубы и бортовой обшивки (ширстрека). 2) Углубление в палубном покрытии для стока воды, идущее вдоль борта слома палубы или комингса.

Ватерлиния – след пересечения плоскости водной поверхности с корпусом судна. Положение ватерлинии на корпусе зависит от загрузки судна. Изменяется при плавании по мере расходования боеприпасов, топлива, воды, масла и др., а также при изменении плотности воды (например, при переходе из водоема с пресной водой в море), обледенении судна и др.



Волнопродуктор – устройство для образования волн в опытовом бассейне при испытании моделей.

Гальюн – водопроницаемая горизонтальная площадка впереди форштевня парусного корабля, закрепленная на прочном **княвдигеде**, впереди которых устанавливалось массивное носовое украшение. Выступающая вперед форштевня носовая наделка первой встречает гребни

штормовых волн и, разрушая монолитность фронта, смягчает ударные нагрузки волн на бушприт, носовые палубы и надстройки, но при этом не способствует всхожести корпуса корабля на волну.

Гировертикаль, гирогоризонт – гироскопическое устройство для воссоздания условной вертикали или плоскости горизонта, относительно которой возможно измерение углов крена и дифферента корабля. В качестве простейшей гировертикали служит трехстепенный астатический гироскоп, ось которого стремится сохранять свое направление в мировом пространстве. Однако по отношению к вращающейся Земле, а также под воздействием качки корабля эта ось будет со временем изменять свое направление. Поэтому без корректирующего устройства такой прибор может служить лишь кратковременным указателем направления (в частности вертикали). Чувствительные элементы судовых гирокомпасов обладают свойством высокостабилизированного гирогоризонта.

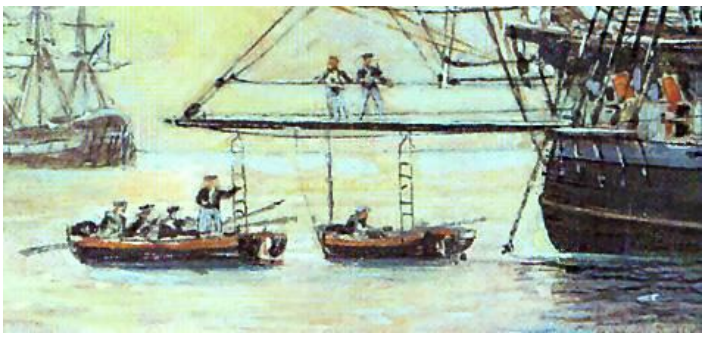
Гироскоп лазерный – прибор для измерения угловых перемещений объектов, в котором измеряются скорости движения встречных световых потоков, излучаемых от одного источника. От механических гироскопов отличаются более высокой надежностью, стабильностью, нечувствительностью к ускорениям.



Движитель – устройство, преобразующее работу двигателя или естественного источника энергии в движение корабля. Для передвижения по воде в качестве движителя могут служить парус, машущий плавник, весло, гребной винт, водометный движитель, воздушный винт, роторный движитель и др.

Дифферент – наклон корабля в продольной вертикальной плоскости относительно поверхности моря. Измеряется дифферентометрами в градусах для подводных лодок или в сантиметрах (разность между углублениями кормы и носа) для надводных кораблей. Влияет на поворотливость корабля, работу гребного винта и пр. Дифферент обычно регулируют приемом (удалением) водяного балласта. Диффе-

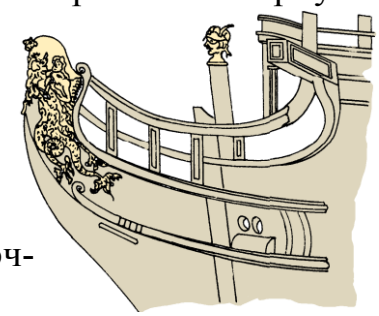
рент, возникающий в результате килевой качки на штормовом волнении, наиболее пагубно влияет на обитаемость корабля, представляет опасность срыва грузов в трюмах и лишает корабль его минимально необходимых мореходных качеств.



Забортный выстрел – (ундер-лиссель-спирт) устройство на корабле в виде горизонтального рея, устанавливаемое перпендикулярно к борту на уровне верхней палубы. Служит для постановки и крепления шлюпок и катеров при стоянке корабля на якоре, а также для посадки личного состава в них. На ходу корабля заваливается к борту.

«Карманный» линкор (линейный корабль) – неофициальное название трех германских военных кораблей: «Дойчланд» (впоследствии «Лютцов»), «Адмирал Шеер» и «Адмирал Шпее», построенных в 1928-1934 годах в рамках ограничений Версальского мирного договора 1919 г. «Карманными» они назывались за небольшие размеры (хотя имели мощное артиллерийское вооружение). Водоизмещение стандартное – 11 700 т (полное до 16 200 т).

Киль – элемент набора; продольная балка или балки, или пояс наружной обшивки судна, расположенные в диаметральной плоскости либо простирающиеся симметрично этой плоскости в районе днища судна и служащие для обеспечения продольной прочности корпуса корабля.



Князвдигед – прочная, наклоненная вперед верхняя часть форштевня парусных кораблей, над которой тросовой связкой укреплялся бушприт, и завершающаяся массивным и прочным носовым украшением.

Кормовая раковина – верхний участок кормовых обводов корпуса, форма которого определяет гидродинамические условия воздействия штормовых волн и зыби на корпус и винто-рулевой комплекс корабля.



Кормовые обводы – форма кормовой части корпуса корабля, определяющая условия поддержания управляемости и стабильной работы движителей при штормовом маневрировании.

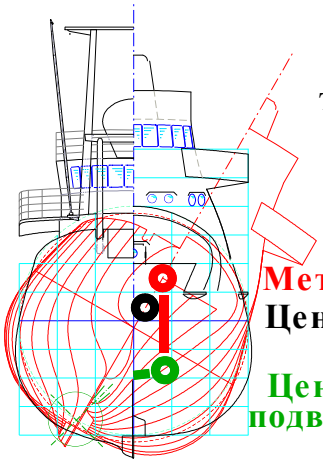
Лаг – навигационный прибор для измерения скорости хода судна и пройденного им расстояния. Различают лаги относительные (измеряют скорость относительно воды) и абсолютные (относительно дна). На морских судах применяют механические лаги, геомагнитные лаги, радиодоплеровские лаги. Старинный лаг состоял из лаглиня с узелками, вытравливался за борт, а по песочным часам определялась скорость в узлах (1 узел = 1 морская миля в час).



Латинские паруса (латинское вооружение) – треугольные паруса, которые пришнуровываются к длинному, часто составному рейку. Одно из древнейших парусных вооружений, сохранившееся до наших дней в неизменном виде. Получили распространение в Средиземном море со средних веков.

Лисели (лизеели) – дополнительные паруса в форме трапеций, которые ставятся на фок- и грот-мачтах в помощь прямым парусам по их сторонам при попутных ветрах. Различают брам-лисели (ставятся с боков брамселей) марса-лисели (с боков марселей) и ундер-лисели (выстрелы).

Лисель-спирты – тонкие выдвижные рангоутные деревья на фока–, грота-реях и на фор- и грот-марса-реях, служащие для постановки лиселей.



Метацентрическая высота – возвышение метацентра над центром тяжести судна. Метацентром называют аппликату центра дуги, по которой движется центр величины погруженного корпуса при малых углах накренения (дифферента). Расстояние от метацентра до центра величины называют метацентрическим радиусом, величина которого определяется продольным (поперечным) моментом инерции площади ватерлинии. Метацентрическая высота рассматривается как удельная мера остойчивости (т.е. приходящаяся на одну тонну весового водоизмещения судна). Увеличение метацентрической высоты способствует резкой качке на волнении, а завышенные величины метацентрических радиусов приводят к увеличению размаха поперечной (продольной) качки. Значение метацентрической высоты поперечной – от долей метра до 2–4 метров у крупных судов, продольной – от 1 до 2 длин корпуса.

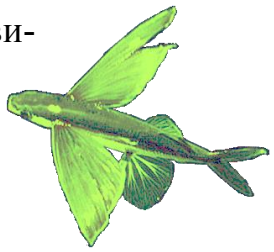
Мидель-шпангоут – линия пересечения теоретической поверхности корпуса вертикальной поперечной плоскостью, проходящей по середине длины судна, на базе которой построен теоретический чертеж судна.

Мореходные качества – основные требования к кораблю определяются законами статики, динамики и гидромеханики корабля, объединенными в курсе наук – Теория корабля. ***Плавучесть и остойчивость*** – это способность корабля устойчиво держаться на поверхности воды, в том числе при воздействии на него ветра и интенсивного волнения. ***Непотопляемость*** – способность корабля оставаться на плаву и не опрокидываться при частичном затоплении корпуса. ***Ходкость*** и ***устойчивость на курсе*** характеризуют способность корабля к прямолинейному движению на взволнованной поверхности моря с минимальными затратами мощности судовых машин. ***Поворотливостью*** называется способность корабля изменять курс и траекторию движения в соответствии с перекладкой руля. ***Плавность качки*** – чем меньше на корабль влияет качка, тем выше его скорость, лучше условия

обитаемости для экипажа, дольше служат судовые механизмы, не расшатывается корпус и т.д.

Обводы корпуса корабля – внешние очертания формы корпуса корабля (судна). Задаются теоретическим чертежом корабля при проектировании и зависят от назначения корабля, его размеров, проектной скорости хода, района плавания, автономности и др. В значительной степени определяют сопротивление воды его движению, управляемость, интенсивность и амплитуду штормовой качки, остойчивость, всхожесть на волну и заливаемость палуб, условия работы движителей и др.

Плавниковые движители – в древнем флоте, в современных странах Африки и в Китае в качестве плавниковых движителей используется кормовые весла. В современном крупнотоннажном флоте технологические решения по созданию таких движителей находятся на стадии научных исследований.



Погибь – выпуклый изгиб палубных бимсов, служащий для ускорения ската потоков воды с верхней палубы, а также обеспечивающий динамическую устойчивость и прочность палуб под воздействием внешних, в том числе ударных, нагрузок.

Подзор кормовой – наклонная часть кормы, выходящая за пределы ахтерштевня. Форма изгиба и сама его величина зависит от типа и количества движителей, особенностей расположения руля, преобладающих скоростей корабля (судна) при его повседневной службе, а также особенностей эксплуатации корабля.

Полубак – возвышение корпуса над верхней палубой в носу корабля. По длине занимает от 1/4 до 2/3 длины корабля, в последнем случае называется удлиненным полубаком.

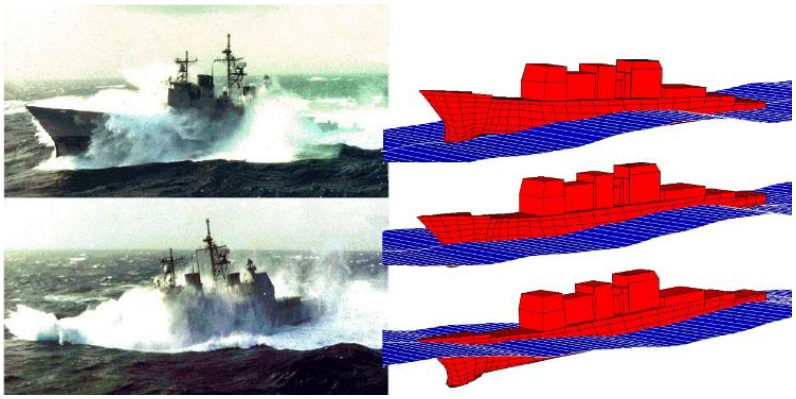
Руль – собранные в единую конструкцию перо руля и баллер руля. Перо руля изгибает диаметральную плоскость корабля, отчего появляется разворачивающий момент и дополнительная «подъемная» сила, отклоняющая корпус корабля в сторону, противоположную циркуляции. Баллер является осью вращения пера руля, и обычно образует кормовой перпендикуляр на теоретическом чертеже корпуса кораб-

ля. Различают балансирные рули, полубалансирные рули и небалансирные рули. На малой скорости, когда эффективность обычного руля падает, используют системы активного управления судном – подруливающие устройства.

Румпель – рычаг, насаженный на голове руля (баллера руля) и служащий для его перекладки.

Рыскание (рыскливость) – свойство судна произвольно уклоняться в ту или другую сторону от курса. Свободное рыскание в штормовых условиях является необходимым условием для уклонения корабля от сильных косых ударов встречных волн, но при этом форма корпуса корабля должна обеспечивать осредненную устойчивость корабля на курсе. Степень рыскливости и устойчивости на курсе регулируется величиной и наклоном подводной части форштевня, которые могут быть выбраны по результатам испытаний мореходности в штормовом опытовом бассейне.

Скула судна – место наиболее крутого изгиба борта, переходящего в носовую или кормовую часть – носовая или кормовая скулы, или в днище – бортовая скула. Мореходные качества корабля в наибольшей степени определяются отработанностью формы скуловых обводов корпуса.

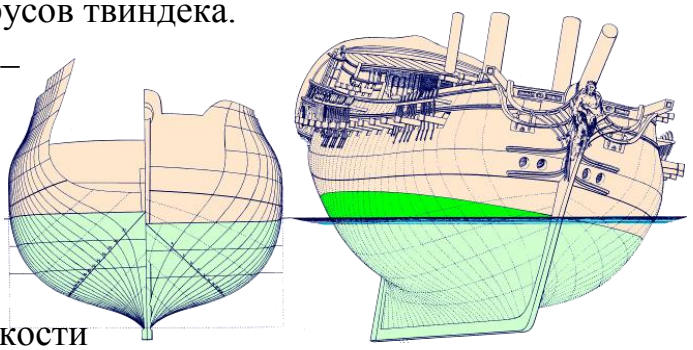


Слеминг – тяжелые удары корпуса о воду при неблагоприятной встрече с крупными гребнями штормовых волн. Слеминг может стать причиной срыва с фундаментов корабельных механизмов, смещения тяжелых грузов или разрушения остова корпуса, что может нарушить его общую прочность и привести к разлому или обширному нарушению герметичности. Чаще всего слеминг происходит по причине излишней всхожести корпуса на волну, отчего при падении носовой оконечности с высокого гребня одной волны происходит сильнейший удар днищем о ее плоскую подошву с после-

дующим глубоким зарыванием корпуса под новый гребень штормовой волны.

Степс: 1 – наглухо прикрепленное к килю корабля (кильсону шлюпки) стальное или деревянное гнездо, в которое вставляется мачта своим шпором; 2 – стакан (гнездо) в палубе, в который вставляется баллер шпиля, и т.п.

Твиндек – межпалубное пространство во внутренней части корпуса сухогрузного судна, лежащее выше трюма. В твиндеке размещаются грузовые помещения, каюты пассажиров и экипажа. На многопалубных судах несколько ярусов твиндека.



Теоретический чертеж – проекции обводов (формы корпуса) корабля в трех взаимно перпендикулярных проекциях: **корпус** – изображение *шпангоутов* на плоскости мидель-шпангоута; **бок** – *батоксов* на диаметральной плоскости; **полуширота** – *ватерлиний* на горизонтальной плоскости. Ватерлиния, пересекающая поверхность воды при расчетной загрузке, называется конструктивной.



Транец – плоский срез кормы у кораблей, судов и яхт-швертботов. Широкая транцевая корма способствует захвату корпуса попутной волной, что может привести к быстрому развороту корабля и его опрокидыванию.

Фальшборт – легкий пояс бортовой обшивки, возвышающийся над верхней палубой. Служит для ограждения края палубы и меньшей ее заливаемости. На судах выполняется, как правило, в носовой и кормовой части палубы.

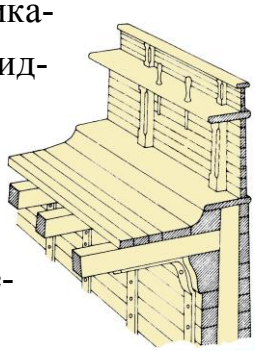
Фок-мачта – передняя мачта на судне, т.е. первая, считая от носа к корме на судах с двумя и большим числом мачт.

Форштевень – деревянная или стальная балка в носу корабля повышенной прочности, на которой закреплена наружная обшивка носовой части корпуса и которая в нижней части корпуса переходит в киль. Наклон форштевня и полнота надводной части корпуса наиболее сильно отражаются на штормовой мореходности корабля. Для пассажирских судов (и современных военных кораблей) форма форштевня, подобно носовым украшениям, нередко выбирается из эстетических принципов. Завышенный форштевень повышает опасность критической нагрузки на корпус в условиях штормового волнения, что для удлиненных кораблей и тяжелых танкеров может привести к поперечному разлому корпуса.

Ходкость – способность корабля к движению на спокойной воде и в условиях интенсивного штормового волнения при заданной мощности главной энергетической установки. Зависит от формы обводов корпуса, соотношения главных размерений, типа движителя. В теории корабля объединяет как научная дисциплина два раздела – сопротивление воды движению корабля (судна) и теорию движителей. Ходкость определяется расчетным путем на стадии проектирования; точность определения проверяется на стадии модельных испытаний; результирующая оценка ходкости выполняется при испытаниях корабля на мерной миле.



Ходовой мостик – огражденная часть палубы ходовой рубки, где расположены приборы управления кораблем: машинные телеграфы, репитеры компаса, лага, выносные индикаторы радиолокатора, гидролокатора и др.



Ширстрек – пояс бортовой обшивки, примыкающей к верхней непрерывной палубе корабля. Является одной из основных продольных связей и де-

лается толще остальных поясов обшивки с целью увеличения общей прочности корабля.

Шканцы – часть верхней палубы парусных кораблей между грот- и бизань-мачтами. На военных кораблях на шканцах выстраивался почетный караул при встрече командования и почетных гостей.

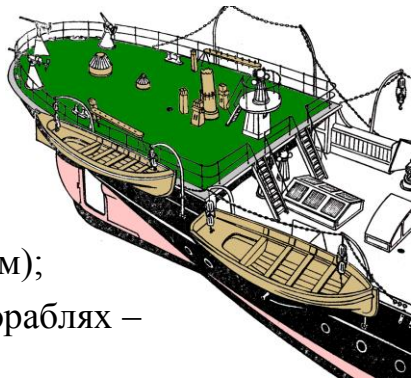
Шкафут – часть верхней палубы парусных кораблей между баком и шканцами (между фок- и грот-мачтами).

Шпангоут – ребро жесткости обшивки корпуса корабля в поперечной плоскости. Шпангоуты являются опорами листов наружной обшивки. На уровне палуб шпангоут замыкается поперечными связями – бимсами. Шпангоут в среднем сечении называется мидель-шпангоутом, изображение которого на теоретическом чертеже позволяет судить о размерах корабля, его конструктивных особенностях.

Шпация – расстояние между двумя соседними шпангоутами. В оконечностях корпуса шпация, как правило, меньше, чем в его средней части, особенно для судов ледового класса.

Шпигат – отверстие в фальшборте и палубе (ватервейсе) корабля, служащее для стока воды

Штормовать – длительно выдерживать шторм. Корабли с механическими двигателями уменьшают ход, а для уменьшения бортовой качки выбирают курсы против или по волне. Парусные корабля при шторме несут штормовые паруса (бизань или фока-стаксель – с прямым парусным вооружением, триселя – с косым).



Ют: 1 – название кормовой надстройки на судах гражданского флота (на кораблях ВМФ она именуется полуютом); 2 – кормовая часть палубы (на парусных кораблях – от кормы до последней мачты) .

Шкала степени волнения на море

Шторм балл м	**Ветер** (max) **м/с**	**Характеристика волнения** **Признаки для определения состояния поверхности моря**
Штиль		
I. 0,25	2,5	**Слабое** Появляются гребни небольших волн. Судно начинает испытывать слабую качку, практически не влияющую на его ходовые качества и условия обитаемости. 
II. 0,75	4,5	**Умеренное** Небольшие гребни волн опрокидываются, но пена не белая, а стекловидная. На большой скорости хода возможны удары волн по носовой скуле судна. 
III. 1,25	8,0	**Значительное** Хорошо заметные небольшие волны, гребни некоторых из них опрокидываются, образуя клубящуюся пену – барашки. 

Шторм балл м	**Ветер** (max) **м/с**	**Характеристика волнения** **Признаки для определения состояния поверхности моря**	
IV. 2,0	10	**Значительное** Волну принимают хорошо выраженную форму, кругом образуются барашки	
V. 3,5	12,5	**Сильное** Появляются гребни большой высоты, их пенящиеся вершины занимают большие площади, ветер срывает пену с гребней волн	
VI. 6,0	16,0	**Сильное** Гребни очерчивают длинные валы ветровых волн, пена, срываемая с гребней ветром, начинает вытягиваться полосами по склонам волн	
VII. 8,5	20,0	**Очень сильное** Длинные полосы пены, срываемые ветром, покрывают склоны волн и местами, сливаясь, достигают их подошвы	
VIII. 11,0	25	**Очень сильное** Пена широкими, плотными, полосами покрывает склоны волн, поверхность становится белой, только местами, во впадинах есть свободные от пены участки	
IX.	29	**Исключительное** Вся поверхность моря покрыта плотным слоем пены, воздух наполнен водяной пылью и брызгами, видимость уменьшена	

ЛИТЕРАТУРА

Историческая

1. ***Алексеев А.И.*** Амурская экспедиция 1849-1855 гг. М.: Мысль, 1974. 192 с.
2. ***Бадигин К.*** По студеным морям. М.: Государственное издательство географической литературы, 1956. 424 с. *Забытая история русских поморов в изложении полярного исследователя из столь же забытых времен интенсивного освоения Арктики первой половины XX века.*
3. ***Балакин С.*** «Парижские тайны» Красного флота. История службы советских линкоров // Военно-морской флот, история военно-морского флота, боевые корабли мира, история их развития. http://www.battleships.spb.ru/1295/history.html, СПб, 1998
4. ***Буров В.Н., Юхнин В.Е.*** Крейсер «Аврора». Памятник истории отечественного кораблестроения. Л.: Лениздат, 1987. 162 с.
5. ***Гуляш Ш, Певной П.*** Парусники. Минск: Лильт, 1996. 224 с. *Довольно своеобразное изложение истории мореплавания и парусного флота. Очень красивые рисунки, однако не претендуют на иллюстрацию знаний о тонких элементах морской грамотности, а имена и морская терминология несколько приукрашены на оригинальный манер западной транскрипции.*
6. ***Грибовский В.Ю., Познахирев В.П.*** Вице-адмирал З.П. Рожественский. СПб: Цитадель, 1999. 280 с. *Грустная повесть об очень противоречивой исторической роли вице-адмирала Зиновия Петровича Рожественского, весь драматизм которого состоял в безукоризненном следовании офицерской чести и гражданской совести русского моряка. Авторы книги стараются не делать излишних выводов, но эмоциональность событий истории России начала XX века, так же как и глубина их непознанности, вряд ли кого-то может оставить безучастным.*
7. История отечественного судостроения. В пяти томах. Под редакцией акад. ***И.Д. Спасского***. СПб: «Судостроение», 1994. *Особая цен-*

ность этого труда в том, что между строк много больше смысла и содержания, чем в многократно отшлифованном цензурой тексте.

8. История штормовой мореходности (от древности до наших дней): по материалам поисковых и научно-исследовательских работ. Калининград, 1975–Владивосток–Санкт-Петербург–Сахалин, 2003 / ***В.Н. Храмушин, С.В. Антоненко, А.А. Комарицын*** и др. – Южно-Сахалинск : Сах. кн. изд-во, 2004. – 288 с., ил. + CD-ROM (http://www.shipdesign.ru/History.html)
9. Жизнь и деятельность кораблестроителя В.П. Костенко. СПб: «Цитадель», «Галея-Принт», 2000. 204 с.
10. ***Костенко В.П.*** На «Орле» в Цусиме. Л.: Судостроение, 1968. 525 с.
11. ***Курти О.*** Постройка моделей судов. Энциклопедия судомоделизма. Л.: Судостроение, 1977. 544 с.
12. ***Крылов А.Н.*** Мои воспоминания. Л.: Судостроение, 1979. 480 с.
13. ***Мельников Р.М.*** Миноносцы типа "Измаил". Судостроение. № 8. Л.: Судостроение, 1981. С. 68-69. *Уверенно-политизированное изложение истории, опирающееся на вполне достоверную техническую информацию. Следование кумиру С.О. Макарову и своеобразное революционно-историческое брожение мысли заставляет автора превозносить оружейников и простых инженеров, частенько опускаясь до неприемлемых выпадов против флотских офицеров, командиров кораблей и адмиралов.*
14. ***Митрофанов В.П., Митрофанов П.С.*** Школы под парусами. Л.: Судостроение, 1989. 232 с. *Полное и профессионально грамотное повествование об истории учебного парусного флота России, выполненное истинными ценителями и знатоками морской практики и кораблестроительного искусства.*
15. ***Невельской Г.И.*** Подвиги русских морских офицеров на крайнем Востоке России, 1849-1855. Хабаровск: Хабаровское книжное издательство, 1969. 421 с. *Историко-географические исследования в изложении ключевых участников дальневосточных событий тех лет. Очень увлекательно!*

16. Основы корабельной архитектуры. Т.1-2. Л.: Судпромгиз, 1948. *Это такая же непреходящая классика, с множеством полезных экспериментальных материалов и теоретических результатов, как и следующая книга Г.Е. Павленко.*
17. ***Павленко Г.Е.*** Сопротивление воды движению судов. М.: Водтрансиздат, 1953. 507 с. *На самом деле, это одна из наиболее полных, внятных и доходчивых книг по корабельной гидромеханике. Однако, особое отношение к столь авторитетному и, безусловно, уважаемому автору, допускавшему эвристики и чистое изобретательство в корабельных науках, пусть даже ориентированных исключительно на студентов вверенного кораблестроительного института, полагает более правильным поминать эти труды в историческом разделе публикаций.*
18. ***Павлюченко Ю.Н.*** Основы художественного конструирования судов. Л.: Судостроение, 1985. 264 с. *Техническая эстетика в кораблестроении с множеством иллюстраций очень странных «технических» решений, в том числе с их пугающей систематизацией.*
19. ***Пантюхов И.М.*** Моряна. Сборник стихотворений. Калининград: Кн.изд-во, 1975. 208 с. с илл. *Безусловно, поэзия и море неразделимы, и чем основательнее моряк проникается жизнью моря, тем глубже становятся поэтические образы и неуловимее личные настроения от его дальних странствий и вечных ожиданий.*
20. ***Пятилетов А.М.*** Морская слава России. Очерки по истории Российского флота. Южно-Сахалинск: Сахалинское книжное издательство, 1996. 168 с.
21. ***Пятилетов А.М.*** Море остается с человеком. Южно-Сахалинск: Сахалинская областная типография, 1997. 192 с.
22. ***Пятилетов А.М.*** Пленники морей и океанов. Южно-Сахалинск: Сахалинская областная типография, 1999. 101 с.
23. ***Скрягин Л.Н.*** Тайны морских катастроф. М.:Транспорт,1986. 366 с.
24. ***Снисаренко А.Б.*** Властители античных морей. М.: Мысль, 1986. 240 с. *Удивительная по полноте и увлекательности изложения книга о средиземноморских цивилизациях, о сложных перипетиях жизни дерзких мореплавателей и о величии стран, способных под-*

держивать активное мореходство. Кроме последовательного и довольно полного исторического контекста древнего мореходства, в книге приводятся наиболее богатые технические свидетельства о древнем кораблестроении, к сожалению, не без преувеличения исторической роли воинственности.

25. ***Снисаренко А.Б.*** Эвпатриды удачи (*трагедия античных морей*). Л.: Судостроение, 1990. 414 с. *По форме изложения и сути то же самое, однако проповедование исторической агрессивности уже представляется излишним.*
26. ***Ханке Х.*** Люди. Корабли. Океаны. Л.: Судостроение, 1976. 432 с.
27. ***Хмельнов И.Н., Турмов Г.П., Илларионов Г.Ю***. Надводные корабли России: история и современность. Владивосток: Уссури, 1996. 445 с.
28. ***Храмушин В.Н., Антоненко С.В., Комарицын А.А.*** История штормовой мореходности. Южно-Сахалинск: Сахалинское книжное издательство, 2004. 280 с.
29. ***Шанько Б.Д.*** Под парусами через два океана. М.: Государственное издательство географической литературы, 1954. 389 с. *Путевые записи капитана парусной шхуны «Коралл», проходившей в 1947 году с Балтики в Тихий океана на пополнение Российского дальневосточного флота.*
30. ***Юрий Ошейко.*** Русская тема в японском кораблестроении // Кладовая морских и авиационных тайн, Нижний Новгород, http://uic.nnov.ru/~teog/tsusim/tema01.htm, 2000.
31. ***Friderik Henrik af Chapman,*** Architectura Navalis Mercatoria. VEB Hinstorf Verlag Rostok. 1968. P.104.
32. ***Kane John R.*** The Speed of the SS United States. Marine Technology. vol. 15, ¹2, April 1978, P.119-143.

Вопросы проектирования и технической эксплуатации флота

1. ***Аносов А.В., Дидык А.Д.*** Управление судном и его техническая эксплуатация. М.: Морской транспорт, 1964. 465 с.
2. ***Ашик В.В.*** Проектирование судов. Л.: Судостроение, 1975. 352 с.

3. ***Бронштейн Д.Я.*** Устройство и основы теории судна. Л.: Судостроение, 1988. 336 с.
4. ***Джилмер Томас С***. Проектирование современного корабля. Л.: Судостроение, 1984. 240 с.
5. ***Егоров Н.И.*** Физическая океанография. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 456 с.
6. ***Клейтон Б., Бишоп Р.*** Механика морских судов. Л.: Судостроение, 1986. 436 с.
7. ***Ногид Л.М.*** Остойчивость судна и его поведение на взволнованном море. Л.: Судостроение, 1967. 242 с.
8. ***Ногид Л.М.*** Проектирование морских судов. Л.: Судостроение, 1976. 208 с.
9. ***Ньюмен Дж***. Морская гидродинамика. Л.:Судостроение,1985.368 с.
10. Справочник капитана промыслового судна / Под редакцией ***Ширяева Е.Д.*** М.: Агропромиздат, 1998. 638 с.
11. ***Филин А.П.*** Введение в строительную механику корабля. СПб: Судостроение, 1993. 640 с.
12. ***Храмушин В. Н.*** Геометрическая интерпретация волнового сопротивления с целью проектирования формы корпуса судна (с.56–58); Историко-технический анализ мореходности и выработка эвристических правил проектирования формы корпуса судна (с.59–60) : X Дальневосточная научно-техническая конференция // Опыт проектирования и модернизации судов для дальневосточного бассейна. – Владивосток: ВНТО им. ак. А. Н. Крылова, 1989.
13. ***Храмушин В.Н.***. Диссертация к.т.н.: «Оптимизация формы корпуса корабля» по специальности 05.08.03 – проектирование и конструкция судов, Владивосток: ДВГТУ, 2002 г.
14. ***Храмушин В.Н.*** Поисковые исследования штормовой мореходности корабля. Владивосток: Дальнаука, 2003. 160 с.
15. ***Шокальский Ю.М.*** Океанография. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1959. 538 с.
16. Unmanned surface vehicle collects ocean data, by Simon Corfield, Technical Manager, Underwater Platforms & Systems, QinetiQ* / International Ocean System, Oct, 2001.

17. Underwater Glider Model Parameter Identification. ***Joshua G. Graver, Ralf Bachmayer, Naomi Ehrich Leonard*** (Mechanical and Aerospace Engineering, Princeton University). David M. Fratantoni, (Physical Oceanography, Woods Hole Oceanographic Institution) / Proc. 13th Int. Symp. on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST), August 2003.
18. ***Webb D. and Jones C***. Slocum electric glider layout. Technical Drawings, 2002.
19. Hobie Cat company, USA, ww.hobiecat.com/kayaking/miragedrive.html

Теоретические вопросы кораблестроения и гидромеханики

1. ***Алферьев М.Я.*** Ходкость и управляемость судов. Сопротивление воды движению судов. М.: Транспорт, 1967. 344 с.
2. ***Артюшков Л.С.*** Динамика неньютоновских жидкостей. СПб.: Изд. ГМТУ, 1997. 460 с
3. ***Артюшков Л.С.*** Расчеты сопротивления воды движению морских транспортных судов. Л.: ЛКИ, 1980. 88 с.
4. ***Артюшков Л.С.*** Расчеты сопротивления при движении судов в особых условиях. Л.: ЛКИ, 1983. 64 с.
5. ***Астарита Дж., Маруччи Дж***. Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей. М.: Мир, 1978. 312 с.
6. ***Астахов А.В., Широков Ю.М***. Курс физики. Т. II. Электромагнитное поле. М.: Наука, 1980. 384 с.
7. ***Белоцерковский О.М.*** Численное моделирование в механике сплошных сред. М.: Наука, 1984. 520 с.
8. ***Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М.*** Метод крупных частиц в газовой динамике. Вычислительный эксперимент. М.: Наука, 1982. 392 с.
9. ***Благовещенский С.Н.*** Качка корабля. Л.: Судпромгиз, 1954. 520 с.
10. ***Благовещенский С.Н., Холодилин А.Н.*** Справочник по статике и динамике корабля. Л.: Судостроение, 1976. 312 с.
11. ***Бородай И.К., Нецветаев Ю.А.*** Мореходность судов. Л.: Судостроение, 1982. 287 с.
12. ***Бэтчелор Дж.*** Введение в динамику жидкости. М.:Мир,1973.760 с.

13. ***Ван-Дайк М.*** Альбом течений жидкости и газа. М.:Мир,1986. 182 с.
14. ***Ван-Ламмерен, Троост, Конинг***. Сопротивление, пропульсивные качества и управляемость судов. Л.: Судпромгиз, 1957. 388 с.
15. ***Воеводин Н.Ф.*** Изменение остойчивости судов. Л.: Судостроение, 1973. 200 с.
16. ***Войткунский Я.И.*** Гидромеханика. Л.: Судостроение, 1982. 456 с.
17. ***Войткунский Я.И.*** Сопротивление воды движению судов. Л.: Судостроение, 1964. 412 с.
18. ***Войткунский Я.И., Першиц Р.Я., Титов И.А.*** Справочник по теории корабля. Л.: Судпромгиз. 1973. 682 с.
19. ***Готман А.Ш.*** Волновое сопротивление и оптимизация обводов водоизмещающих судов. Новосибирск. Диссертация д.т.н. № Г/р 05.9.60 001867, 1996. 207 с., прил. 81 с.
20. ***Готман А.Ш.*** Определение волнового сопротивления и оптимизация обводов судов (Часть 1. Волновое сопротивление судов. Часть 2. Методы расчета волнового сопротивления. Оптимизация обводов корпуса водоизмещающих судов). Новосибирск: НГАВТ,1995. 322с.
21. ***Готман А.Ш.*** Проектирование обводов судов с развертывающейся обшивкой. Л.: Судостроение, 1979. 192 с.
22. ***Кацман Ф.М., Пустошный А.Ф., Штумпф В.М.*** Пропульсивные качества морских судов. Л.: Судостроение, 1972. 320 с.
23. ***Клейтон Б., Бишоп Р.*** Механика морских судов: Пер. с англ. Л.: Судостроение, 1986. 436 с.
24. ***Костюков А.А.*** Сопротивление воды движению судов. Л.: Судостроение, 1966. 448 с.
25. ***Костюков А.А.*** Теория корабельных волн и волнового сопротивления. Л.: Судпромгиз, 1959. 310 с.
26. ***Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В.*** Теоретическая гидромеханика. Ч. I. М.: Физматгиз, 1959. 584 с.
27. ***Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В.*** Теоретическая гидромеханика. Ч. II. М.: Физматгиз, 1959. 728 с.
28. ***Крылов А.Н.*** Избранные труды. Л.:Академия наук СССР,1958.804с.
29. ***Крылов А.Н.*** Лекции о приближенных вычислениях. Л.: Академия наук СССР, 1933. 541 с.

30. ***Лойцянский Л.Г.*** Механика жидкости и газа. М.:Наука, 1973. 848 с.
31. ***Луговский В.В.*** Гидродинамика нелинейной качки судов. М.: Наука, 1973. 848 с.
32. ***Орлов Ю.Ф.*** Потенциал ускорений в гидродинамике корабельных волн. Новосибирск: Наука, 1979. 214 с.
33. ***Панченков А.Н.*** Теория потенциала ускорений. Новосибирск: Наука, 1975. 222 с.
34. ***Прандтль Л., Титьенс О.*** Гидро- и аэромеханика. Т. 1. Равновесие. Движение жидкостей без трения. М.Л.: Государственное технико-теоретическое издание, 1932. 222 с.
35. ***Прандтль Л., Титьенс О.*** Гидро- и аэромеханика, Т. 2. Движение жидкостей с трением и технические приложения. М. Л.: Государственное технико-теоретическое издание, 1935. 312 с.
36. Проблемы прикладной гидромеханики судна. / Под редакцией ***Титова И.А.*** Л.: Судостроение, 1975. 352 с.
37. ***Роуч П.*** Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980. 616 с.
38. ***Семенов-Тян-Шанский В.В.*** Статика и динамика корабля. Л.: Судостроение, 1973. 603 с.
39. ***Семенов-Тян-Шанский В.В., Благовещенский С.Н., Холодилин А.Н.*** Качка корабля. Л.: Судостроение, 1969. 392 с.
40. Справочник по теории корабля. Т. 1. / Под редакцией ***Войткунского Я.И***. Л.: Судостроение, 1985. 764 с.
41. ***Стокер Дж.*** Волны на воде. М.: Иностранная литература, 1959. 618 с.
42. ***Титов И.А., Егоров И.Т., Дробленков В.Ф.*** Ходкость быстроходных судов. Л.: Судостроение, 1979. 256 с.
43. ***Ханович Х.*** Сопротивление воды движению судов. М.: Военное издание. МВС, 1946. 316 с.
44. ***Хаскинд М.Д.*** Гидродинамическая теория качки корабля. М.: Наука, 1973. 327 с.
45. ***Холодилин А.Н.*** Стабилизация судна на волнении. Л.: Судостроение, 1972. 232 с.

46. ***Храмушин В.Н.*** Трехмерная тензорная математика вычислительных экспериментов в гидромеханике. Владивосток: ДВО РАН, 2005. 212 с.
47. ***Шебалов А.Н.*** Нелинейная теория волн и волнового сопротивления: Учебное пособие. Л.: Изд.ЛКИ, 1984. 107 с.
48. ***Michell J.H.*** The wave resistance of a ship. // Philosophical Magazine, ser. 5. London, 1898. Vol. 45. P.106-123 (Shipdesign.ru/JHM-rus.html).

Патенты и заявки на изобретения

1. *Храмушин В. Н.* Корабль без бортовой качки на волнении. *Патент № **2360827*** от 2009.07.10, бюл. № 19. Shipdesign.ru/Invent/01.html
2. *Храмушин В. Н.* Корабль без килевой качки на ходу на волнении. Заявка: рег. № 2007133625/11 от 2007-09-07, Бюл. № 8. от 2009-03-20. Shipdesign.ru/Invent/02.html
3. *Храмушин В. Н.* Корабль с плавниковым движителем. *Патент № **2360831*** от 2009.07.10. Бюл. № 19. Shipdesign.ru/Invent/03.html
4. *Храмушин В. Н.* Активный стабилизатор килевой и бортовой качки корабля – штормовой аварийный движитель. *Патент № **2384457*** от 20 марта 2010 г. Бюл. № 8. Shipdesign.ru/Invent/04.html
5. *Храмушин В. Н.* Корабль гидрографической и патрульной службы. *Патент № **2384456*** от 2010-03-20. Бюл. № 8. Shipdesign.ru/Invent/05.html
6. *Храмушин В. Н.* Корабль, остойчивый в штормовом плавании. *Патент № **2487043*** от 2012-11-01. Shipdesign.ru/Invent/06.html
7. *Храмушин В. Н.* Рыболовное судно северных морей. *Патент № **2535382*** от 2014.07.28, бюл. № 34 Shipdesign.ru/Invent/07.html
8. *Храмушин В. Н.* Носовая оконечность быстроходного надводного корабля или относительно тихоходного гражданского судна повышенной штормовой мореходности и ледовой проходимости в автономном плавании – «Форштевень и скула корабля» (Stem). *Патент № RU-2607136-C2, бюл.№ 1 от 2017-01-10.* Shipdesign.ru/Invent/08.html
9. *Храмушин В. Н.* Кормовая оконечность стабилизированного для штормового плавания корабля – «Ахтерштевень и кормовой подзор

корабля» (Stern). *Патент № RU-2607135-C2, бюл. № 1 от 2017-01-10.* Shipdesign.ru/Invent/09.html

10. *Храмушин В. Н.* «Универсальное транспортное судно» (Univer86). СахГУ: *Патент № RU-2603709-C1*, бюл. № 33 от 2016-11-27. Shipdesign.ru/Invent/10.html.
11. *Храмушин В. Н.* «Морской спасатель – научно-исследовательское судно» (A1202). СахГУ: *Патент № RU-2603818-C1*, бюл. № 33 Shipdesign.ru/Invent/11.html
12. *Храмушин В. Н.* «Каботажное пассажирское судно» (A1205). Рег. № 2016150049/11(080348) от 2016-12-19 *(составлено 2016-12-02).* Shipdesign.ru/Invent/12-Coaster.html.
13. *Храмушин В. Н.* «Надводный борт и верхняя палуба корабля» (Deck). Рег. № 2016150045/20(080344) от 2016-12-19 Shipdesign.ru/Invent/13-Ship_Deck.html.
14. *Храмушин В. Н.* «Гидродинамическая модель очага цунами». Рег. № 2016150038/28(080336) от 2016-12-19. Shipdesign.ru/Invent/15.html.
15. *Храмушин В. Н.* «Гидродинамическая модель источника штормовых нагонов и экстремальных течений под воздействием подвижного атмосферного тайфуна». Рег. № 2016150042/28(080340) от 2016-12-19. Shipdesign.ru/Invent/14.html.
16. *Храмушин В.Н., Малашенко А.Е.* Сверхмалое автономное гидрофизическое судно с плавниковым движителем. Патент на полезную модель № 65018(13), Бюл. № 21. СКБ САМИ ДВО РАН. Shipdesign.ru/Ocean/SKB-01-23.html
17. *Храмушин В.Н., Малашенко А.Е.* Сверхмалое автономное гидрофизическое судно. Патент на полезную модель № 51586(13), Бюл. № 6 от 2006.02.27, СКБ САМИ ДВО РАН. Shipdesign.ru/Ocean/SKB-01-22.html
18. *Храмушин В.Н.* «Контекстная графика» – (Window-Place) *Контекстно-зависимая среда построения трехмерной графики OpenGL с использованием виртуальных процедур C++ и многооконного интерфейса Windows со стековым наложением графических и тек-*

стовых фрагментов. СахГУ № 2010615850 от 8 сентября 2010г. Shipdesign.ru/SoftWare/2010615850.html

19. *Храмушин В.Н.* «Hull» – *Построение аналитической формы корпуса корабля, расчеты волнового сопротивления, кривых элементов теоретического чертежа и диаграмм остойчивости морских судов.* СахГУ № 2010615849 от 2010-09-08. Shipdesign.ru/SoftWare/2010615849.html
20. *Храмушин В.Н.* «Ani» – *Прямые вычислительные эксперименты для моделирования цунами, штормовых нагонов, экстремальных течений и приливного режима в открытом океане и вблизи побережья.* СахГУ № 2010615848 от 2010-09-08. Shipdesign.ru/SoftWare/2010615848.html
21. *Храмушин В.Н.* «Mario» – *Интерактивный океанографический программный комплекс для ведения и анализа цифровых приливных архивов и мореографных записей колебаний уровня моря.* СахГУ № 2010615847 от 2010-09-08. Shipdesign.ru/SoftWare/2010615847.html
22. *Храмушин В.Н.* «Sakhalin» – *Информационно-картографическая система.* СахГУ № 2010615845 от 2010-09-08. Shipdesign.ru/SoftWare/2010615845.html
23. *Храмушин В.Н., Минервин И.Г.* База данных: «Батиметрия» – *Цифровые батиметрические массивы (Охотское море).* СахГУ №2010620626 от 2010.10.22. Shipdesign.ru/SoftWare/2010620626.html
24. *Храмушин В.Н., Шевченко Г.В., Симаков Е.Е.* База данных: «Сахалин - море» – *Расчетные и регистрируемые колебания уровня моря на Дальнем Востоке России.* СахГУ № 2012620509 от 2012-06-05. Shipdesign.ru/SoftWare/2012620509.html.
25. *Храмушин В. Н.* «Tensor» – Программа для построения числовых объектов и функций трехмерной тензорной математики при реализации вычислительных экспериментов в гидромеханике. СПбГУ № 2013619727 от 2013-10-14. Shipdesign.ru/SoftWare/2013619727.html;
24. *Богданов А. В., Храмушин В.Н.* «Ядро» – Интерактивный графический программный комплекс для моделирования взаимодействия поляризованных корпускул в трехмерном пространстве. СПбГУ

№2013619726 от 14 октября 2013 г. Shipdesign.ru/SoftWare/2013619726.html;
25. *Дегтярев А. Б., Богданов А. В. Храмушин В. Н.* «Интерактивный графический программный комплекс для построения и визуального анализа штормовой поверхности моря» (Волна). СПбГУ № 2013619728 от 3013-10-14. Shipdesign.ru/SoftWare/2013619728.html;
26. *Дегтярев А. Б., Храмушин В. Н.* «Программа интерактивной графической визуализации спектральных зависимостей для парных и распределенных по морским акваториям временных рядов» (SpecrM). СПбГУ № 2015618259 от 4 августа 2015 г. Shipdesign.ru/SoftWare/2015618259.html;
27. *Богданов А. В., Храмушин В. Н.* База данных: «Vessel» – Цифровые теоретические чертежи для проектного анализа гидростатических характеристик, остойчивости и ходкости корабля. СПбГУ № 2015621368 от 2015.09.08 Shipdesign.ru/SoftWare/2015621368.html