

Целевое проектирование кораблей и судов
для штормовых и ледовых условий
Дальнего Востока России



Сызрань – Калининград – Севастополь – Ленинград – Владивосток – Южно-Сахалинск –
– Санкт-Петербург – מִשְׁנָן –
1974 – 2018-06-08 ...

Центральное Правление Российского научно-технического общества
судостроителей имени Алексея Николаевича Крылова,
подсекция мореходных качеств судов в штормовых условиях

Калининградское мореходное училище
судоводительское отделение

Ленинградский кораблестроительный институт
кафедра гидромеханики / теории корабля

Дальневосточный государственный технический университет
кафедра проектирования и теории корабля

Санкт-Петербургский государственный университет
факультет Прикладной математики – процессов управления
кафедра компьютерного моделирования и многопроцессорных систем

Рабочие материалы
2012 – 2018-06-08

**Целевое проектирование кораблей и судов
для штормовых и ледовых условий**
Дальнего Востока России

Василий Николаевич Храмушкин

Южно-Сахалинск

2018

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	6
Об инженерных решениях целевого непротиворечивого проектирования корабля	8
<i>Об этапах проектирования корабля с поверхкой инженерных решений в морской практике</i>	9
<i>Целевое проектирование корабля как поиск непротиворечивого диалога с океаном.....</i>	12
Эволюционное становление корабельного дела и хорошей морской практики.....	14
<i>Исторический опыт инженерной практики достижения всепогодного мореходства</i>	16
<i>Активное маневрирование с ходом по штормовой волне.....</i>	18
<i>Безопасное штормование носом на волну</i>	20
<i>Флот Великих географических открытий и освоения океанов</i>	21
<i>Эффективность флота ограниченного района плавания</i>	23
<i>Гидродинамические особенности кораблей конца XIX – начала XX веков</i>	24
Эволюционные обобщения проектных решений	30
Показательные кораблестроительные решения последних лет.....	33
ГЛАВА 1. ПРОЕКТНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ СУДОВЫХ ОБВОДОВ	
для достижения всепогодной мореходности корабля	36
<i>Форма корпуса корабля определяет особенности и методы эффективного кораблевождения</i>	37
1.1. Проектные особенности обводов корабля, их влияние на интенсивность волнообразования и силовое воздействие штормовых волн в рамках теории Мичелла	40
<i>Интерпретация расходящихся корабельных волн.....</i>	41
<i>Формула Мичелла для волнового сопротивления судна</i>	44
<i>Особенности корабельного волнообразования</i>	48
<i>Вычислительная модель на основе интеграла Мичелла</i>	50
<i>Условие излучения свободных корабельных волн</i>	52
<i>Группировка волн в разрушающиеся гребни</i>	53
1.2. Численная реализация расчетов волнового сопротивления и проектная оценка особенностей судовых обводов.....	55
<i>Интеграл по ватерлиниям.....</i>	56
<i>Интегрирование результатов расчета по ватерлиниям</i>	57
<i>Интеграл по волновому спектру, расчет сопротивления</i>	58

1.3. Аналитическое описание судовых обводов, проектный анализ и оптимизация элементов формы корпуса	60
<i>Представление формы корпуса для расчетов на ЭВМ.....</i>	<i>60</i>
<i>“Параболические” (степенные) обводы.....</i>	<i>62</i>
<i>Асимметричный относительно мидель-шпангоута корпус</i>	<i>64</i>
<i>Моделирование уменьшенной площади ватерлинии.....</i>	<i>67</i>
<i>Форштевень.....</i>	<i>68</i>
<i>Ахтерштевень</i>	<i>70</i>
<i>Примеры построения аналитических корпусов.....</i>	<i>70</i>
Проектные заключения по судовым обводам на основе результатов вычислительных экспериментов	74
ГЛАВА 2. ПРЕДНАЗНАЧЕНИЕ СУДНА – ВСЕСЕЗОННАЯ НАВИГАЦИЯ В СЛОЖНЫХ, ШТОРМОВЫХ И ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЯХ	78
<i>Математические модели штормовых волн и гидромеханика их силового взаимодействия</i>	<i>79</i>
<i>Особенности штормового кораблевождения</i>	<i>81</i>
<i>Особенности корабельного волнообразования и влияние обводов на воздействие штормовых волн.....</i>	<i>84</i>
2.1. Эффективность мореходства достигается мореходными качествами судов в сложных и штормовых условиях плавания	86
<i>Режим штормового хода навстречу и по волне.....</i>	<i>87</i>
<i>Активный ход вразрез штормовой волне</i>	<i>89</i>
<i>Аварийное плавание или особые режимы хода лагом к волне.....</i>	<i>90</i>
2.2. Ключевые проектные решения для достижения мореходности и эффективности корабля.....	91
<i>Корабль без бортовой качки на волнении.....</i>	<i>91</i>
<i>Корабль без килевой качки на ходу на волнении.....</i>	<i>93</i>
<i>Корабль, остойчивый в штормовом плавании.....</i>	<i>95</i>
<i>Корабль, остойчивый в штормовом плавании.....</i>	<i>101</i>
<i>Надводный борт и верхняя палуба корабля.....</i>	<i>106</i>
<i>Носовая оконечность быстроходного надводного корабля или относительно тихоходного гражданского судна повышенной штормовой мореходности и ледовой проходимости в автономном плавании – «Форштевень и скула корабля».....</i>	<i>113</i>
<i>Кормовая оконечность стабилизированного для штормового плавания корабля – «Ахтерштевень и кормовой подзор корабля»</i>	<i>121</i>
<i>Корабль с плавниковым движителем</i>	<i>128</i>
<i>Активный стабилизатор килевой и бортовой качки корабля – штормовой аварийный движитель.....</i>	<i>131</i>

ГЛАВА 3. ПРОЕКТНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫХ КОРАБЛЕЙ И	
Судов повышенной мореходности	136
<i>Универсальное транспортное судно.....</i>	<i>140</i>
<i>Варианты рыболовных траулеров</i>	<i>146</i>
<i>Пассажирское судно.....</i>	<i>153</i>
<i>Каботажное судно Сахалино-Курильского края.....</i>	<i>158</i>
<i>Океанский спасатель – научно-исследовательское судно.....</i>	<i>166</i>
<i>Патрульно-гидрографический корабль (корвет).....</i>	<i>171</i>
Оценка корабельных обводов и сравнительные испытания	
гипотетического корпуса, эталонных и перспективных моделей	
судов.....	176
<i>Результаты ходовых испытаний и оценка мореходных качеств</i>	<i>183</i>
О Сахалинском морском экспериментальном полигоне для	
проектных и мореходных изысканий в штормовом море	187
<i>Бортовые счетно-решающие комплексы и штурманские базы</i>	
<i>знаний.....</i>	<i>188</i>
<i>Сахалинский опытный полигон для мореходных испытаний судов</i>	
<i>и штормовых экспериментов в открытом море</i>	<i>190</i>
<i>Заключение о сахалинской морской научной школе.....</i>	<i>193</i>
Благодарности	194
Общее заключение.....	195
Литература.....	198

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».

Современный флот, как правило, имеет фундаментальное преимущество перед средневековыми кораблями и старинными пароходами, выражющееся 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 имеет следствием завышение эксплуатационных расходов на дальних переходах в спокойную и в свежую погоду.

Дальний Восток России нуждается в обновлении каботажного океанского флота с целевым предназначением к всепогодной и всесезонной навигации на транспортных коммуникациях и в акваториях освоения морских ресурсов. Проектные изыскания для перспективных судов важно концентрировать на достижение устойчивой и бесперебойной работы флота в сложных, штормовых и ледовых условиях, по необходимости сводя к минимуму требования к ходкости и остойчивости на тихой воде, со снижением неоправданно завышенной парусности и излишних надводных объемов в общекорабельной архитектуре, и др.

В инженерных поисках целесообразно обратиться к поверенным морской практикой шедеврам кораблестроения эпохи становления океанского мореходства, когда непротиворечивое проектирование и единение корабля со штормовой стихией доверялось авторитетным мореплавателям. На этом пути выявляются основные режимы штормового плавания корабля; с означением рекомендаций судоводителям по выбору курса и скорости хода для эффективного исполнения поставленных задач в любых: сложных, штормовых и ледовых условиях плавания; и, как

следствие, в сравнении устанавливаются ключевые элементы формы корпуса и общекорабельной архитектуры перспективного каботажного флота, наилучшим образом отвечающего условиям всепогодного мореходства в дальневосточных морях России.

В настоящей диссертации обобщаются многолетние поисковые исследования в области непротиворечивого целевого проектирования кораблей и судов, с примерами согласования технических решений по эффективности мореходства в свете оптимального построения морской техники и навигационной инфраструктуры в целом. Задействуемые методы постановки, обоснования и контроля результатов проектных изысканий привносят в кораблестроительные изыскания инженерные разработки из навигационных наук и хорошей морской практики, с естественным единением множественности технических новаций целевого проектирования узкоспециализированного корабля для конкретных географических условий.

Об инженерных решениях целевого непротиворечивого проектирования корабля

Современные кораблестроительные технологии предопределяют новые возможности целевого проектирования морских судов, изначально адаптированных к условиям всепогодного и штормового мореплавания с наивысшей эффективностью на конкретных региональных морских коммуникациях или рыбных промыслах. В проектировании перспективного флота это проявляется в усилении творческого взаимодействия корабелов и мореплавателей, что обусловлено взаимопроникновением хорошей морской практики и чисто инженерных изысканий, широко известных ныне в виде общедоступных штурманских тренажеров, систем автоматического проектирования сложной морской техники и повсеместно используемых бортовых счетно-решающих и навигационных комплексов.

Рассматривая корабль в качестве унифицированной инженерно-технической системы отметим недостаточность математических формализаций или строгих количественных критериев для оптимизационного согласования элементов формы корпуса и общекорабельной архитектуры. Мореходные качества корабля определяются не столько формальной логикой или завершенными инженерно-техническими построениями, на практике повсеместно востребуется опыт хорошей морской практики – искусства судовождения в сложных навигационных, штормовых и ледовых условиях как для добротных кораблей и судов, так и для прочих маломореходных плавучих сооружений специального назначения.

Оптимизация в морской технике строится на частных инженерных решениях при отсутствии «достаточных условий» для обоснования единственно верного проектного заключения. Свобода и необходимость творческого подхода обуславливается противоречивостью исходных требований к перспективному кораблю, разрешение которых возможно с позиций морской грамотности на основе глубоких знаний навигационно-гидрометеорологических условий эксплуатации перспективной морской техники. Тогда суть и методика целевого непротиворечивого проектирования определится согласованием встречных этапов поисковых изысканий в рамках конструкторских принципов «сверху-вниз» – от за-

данной цели к наилучшей реализации, и «снизу-вверх» – от технологических возможностей к адекватной композиции естественных инженерных решений для корабля с наилучшими мореходными качествами [20].

Об этапах проектирования корабля с поверхкой инженерных решений в морской практике



Рис. 1. Блок схема в форме троичного иероглифа по проектной схеме «сверху-вниз»: от обобщенных теоретических предпосылок к частным инженерно-техническим решениям. Столбцы матрицы попарно связаны исторически проверенными 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.

Целевое проектирование и поверка на непротиворечивость всех найденных проектных решений формализуются с помощью двух взаимнообратных логических матриц (тройных иероглифов), как: анализ «сверху–вниз» – от общих требований к частным техническим решени-

ям (Рис. 1); и синтез «снизу–вверх» – от доступных технологических возможностей к оптимальному по назначению проекту корабля в целом (Рис. 2).



Рис. 2. 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.

Настоящее исследование основано на концепции 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 [61]. Рассматриваются звенья обоснований среднего (центрального) уровня проектных изысканий, обобщенных в рамках троичной матрицы поискового анализа в направлении сверху вниз (Рис. 1), где определяются и поворяются ключевые проектно-технические решения в

независимых междисциплинарных связях хорошей морской практики и математической 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 опытные исследования в области гидромеханики корабля способны опираться на штурманский опыт активного штормового маневрирования, изначально связанного неписанными законами хорошей морской практики.

Проверочная 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 научностью. Успешные результаты морских изысканий (Рис. 2) 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.

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 formalизован в качестве целевых функций для достижения наивысшей производственной эффективности судна – специализированного морского инженерного сооружения, как на этапах его проектирования и постройки, так

и в последующей эксплуатации под ответственностью тех же капитанов-наставников региональных морских служб.

Исследования мореходных и эксплуатационных качеств исторического и 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. *«Морское дело без теории – пагубно; наука без практики – бесплодна».*

Целевое проектирование корабля как поиск непротиворечивого диалога с океаном

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



Рис. 3. Китайская джонка – пришедшее из глубины веков совершенное парусное судно с превосходной мореходностью.

Концепция целевого непротиворечивого проектирования корабля ориентирована на всестороннее согласование инженерных решений для строго определенных географических, навигационных и гидрометеорологических условий мореходства; для заданного уровня обустройства

региональной морской инфраструктуры и должностной компетентности береговых служб и судовых экипажей. Приоритет в выборе проектных решений без привнесения ответственности мореплавателей за формирование общекорабельной архитектуры; за компоновку судовых устройств и механизмов, как следствие, обновит методики типового кораблестроения, и в будущем побудит судовладельца пересмотреть запретительные наставления судоводителям в интересах достижения большей эффективности морских работ и каботажного судоходства.

Непротиворечивое проектирование корабля означает исполнение всего комплекса морских изысканий по оптимизации инженерно-технических решений в судостроении для предельно точного и полного воплощения реального опыта эксплуатации и хорошей морской практики всепогодного управления кораблем в конкретных географических районах океана, что для Дальнего Востока России сводится к необходимости достижения всех аспектов кораблевождения в сложных, ледовых и штормовых условиях судоходства с обеспечением всепогодного ведения судовых работ по прямому предназначению корабля.

Новые проекты кораблей и судов для всесезонной и всепогодной навигации в сложных, штормовых и ледовых условиях дальневосточных морей должны в полной мере наследовать достижения эволюционного развития кораблестроения с современными обновлениями энергетических установок и устройств автоматического управления и стабилизации хода, курса и качки корабля на штормовом волнении.

Навигационные условия Сахалина и Курильских островов осложняются фактическим отсутствием портов-убежищ, и в случае штормовых предупреждений флот вынужден уходить в открытое море, где в полной мере востребуются древний капитанский опыт штормования и всепогодного ведения морских работ по основному предназначению корабля. Неограниченная штормовая мореходность служит эффективности морских работ и транспортных коммуникаций под нераздельной ответственностью авторитетных мореплавателей, обладающих совершенной морской техникой и судоводительскими наставлениями, создаваемые согласованно на исходных этапах проектировании всех типов кораблей и судов, так же как и всех других морских инженерных сооружений и объектов морской инфраструктуры.

Эволюционное становление корабельного дела и хорошей морской практики

Хронологически связанная история кораблестроения отсчитываеться от развитой морской инфраструктуры Тихого и Индийского океанов (Рис. 3), с уникальным по технологической сложности речным и океанским флотом, олицетворявшим достижения передовой научной мысли и производственного потенциала морских государств Азии. По мере эволюционного роста размеров и водоизмещения исторических судов, ярче и отчетливее проявляются инженерные решения о непротивлении штормовой стихии – минимизации внешнего силового воздействия на корабль со стороны штормовых волн и ураганных ветров.

Архитектура и внешний облик исторического корабля строго обусловлено режимами безопасного маневрирования в условиях штормовых ветров и волнения, что в реальной инженерной и морской практике определяется относительной прочностью корпуса для достижения наилучшей ходкости в свежую погоду; возможностью удержания безопасного штормового курса в одном из трех исторически выверенных режимов штормования: лагом к волне, по волне и носом на волну, полагаясь лишь на силы экипажа в работе с веслами и парусами в сложных и штормовых условиях плавания:

1 – ход лагом к волне до настоящего времени реализуется на деревянных лодках на реке Волге; ранее использовался древними египетскими судами на Ниле и широкими норвежскими лодиями для мелководных акваторий, в том числе для дальнего и океанского плавания. Такие суда обладают чрезмерной остойчивостью, отчего испытывают интенсивную бортовую и кильевую качку в темпе быстрых наклонов поверхности штормовых волн, и, безусловно, нуждаются в активной корректировке курса для удержания корпуса вдоль гребней наиболее крупных и опасных штормовых волн, что на древних судах выполнялось с помощью кормовых плавниковых весел. Такой режим штормового мореходства принципиально недопустимо рассматривать в качестве базового для судов большого водоизмещения;

2 – активный штормовой ход по волне применяется современными парусными яхтами с широкой кормой, и вполне крупными спасательны-

ми буксирами с развитой носовой надстройкой; ранее активно использовался на шлюпах русских поморов в штормовых широтах Северного ледовитого океана. Судно среднего водоизмещения на курсе по ветру испытывает плавную качку со значительным снижением силовых нагрузок на корпус со стороны крупных гребней попутных штормовых волн, что обеспечивается поддержанием устойчивости на курсе и управляемости с помощью кормового навесного руля, эффективно работающего при относительно высокой скорости хода под носовым прямым парусом;

3 – штормование на курсе носом на волну, к несчастью, ныне стало практически единственным средством бесцельного сдерживания хода судна для обеспечения его безопасности в штормовых условиях при чрезвычайных внешних нагрузках на главные машины и рулевые устройства. Такой метод исторически унаследован от древних финикийских военных кораблей с носовым бульбом-тараном; штормование носом на волну создало условия безопасности дальних океанских походов средневековых парусников эпохи Великих географических открытий. Асимметрия форм носовой и кормовой оконечностей корпуса придает судну свойства флюгера по отношению к ветру и волнению, что достигается созданием специальных обводов и отработкой формы надводной части корпуса для минимизации силового воздействия от интенсивнейших штормовых нагрузок на корпус судна со стороны набегающих волновых фронтов, и такой асимметрии вполне достаточно для безопасного ожидания у моря хорошей погоды без активных действий экипажа.

Последний вариант штормового безвременья до настоящего времени вынужденно включается для «спасения» немореходного судна в штормовом море при предельно высокой нагрузке на главные машины и рулевые устройства, заставляя экипаж и пассажиров терпеть невыносимые условия обитаемости; и пока прочности ширстречного пояса хватает для удержания судового груза в циклах свободного полета в невесомости с кратным умножением сил веса под действием бортовой и вертикальной качки; пока безмерные перегрузки бортовых механизмов не преодолевают прочностные барьеры и ресурсы работоспособности главных машин и систем управления в столь экстремальных условиях.

При современной энергоооруженности океанских кораблей в открытом море возможно использование комбинированных режимов

штормового маневрирования, и достижение эффективной ходкости произвольными курсами относительно ураганных ветров и штормового волнения, для чего необходима тщательная инженерная отработка обводов, формы корпуса и общекорабельной архитектуры для конкретных географических условий, с безусловным согласованием всех требований судоводителей по условиям практической эксплуатации перспективного флота в заданном морском районе. Поиск и оптимизация указанных технических решений определяет суть «целевого непротиворечивого проектирования корабля», ключевые результаты которого рассматриваются в настоящей работе.

В проектировании перспективного корабля важно предусматривать возможность пассивного штормования курсом носом на волну, например в случае аварийной остановки главных машин или поломки рулевых устройств, что принципиально обеспечивается искусственным воссозданием достоинств древних судов (Рис. 3) с помощью специальных забортных средств или судовых устройств, предназначенных для практической реализации вышеперечисленных исторических режимов штормового плавания.

Исторический опыт инженерной практики достижения всепогодного мореходства

Древние египетские суда (Рис. 4) отличаются широким корпусом с малой осадкой и весьма заметным прогибом килевой линии с плавными подъемами штевней в оконечностях, что в первую очередь служит для обеспечения подходов к пологому речному берегу, а под свежими ветрами на открытых водоемах отчасти предотвращает забрызгиваемость грузов на косых курсах относительно волнения. Седловатость линии борта и режим юления кормовыми гребными веслами служат достижению ходкости в условиях интенсивной качки на волнении, с уверенным удержанием курса по минимуму заливаemости при встречах с девятыми валами групповых структур свежих штормовых волн, которые в динамике характеризуются свойствами малоподвижных стоячих валов. Эти же кормовые плавниковые весла становятся эффективными движителями для поддержания хода на встречных течениях полноводных рек.

Нельзя утверждать о возможности безопасного выхода подобных плоскодонных судов на нерегулярное прибрежное волнение в открытом море. Недостаточная прочность и большая ширина корпуса могут привести к расшивке борта и/или к неизбежному заливанию в условиях штормового ветра и чрезвычайно опасного волнения на прибрежных мелководьях.



Рис. 4. Корпус древнего египетского судна приспособлен для речного плавания с частыми подходами к пологому необорудованному берегу.

Для достижения штормовой мореходности при условии незаливаемости беспалубного судна, форма корпуса должна обладать следующими особенностями:

- *Большое отношение ширины к высоте корпуса в районе мидель-шпангоута ($B/H > 3 \div 4$); седловатость линии борта с развитыми скулами и высоким штевням в оконечностях;*
- *Низкий надводный борт, не воспринимающий кренящего давления ветра, и широкий корпус, обеспечивающий избыточную поперечную остойчивость с резкой бортовой качкой синхронно с динамикой крутизны поверхности штормовой волны;*
- *Округлая форма мидель-шпангоута и развал бортов на уровне действующей ватерлинии создают крутые ветви на диаграммах начальной статической остойчивости, что при низком центре тяжести позволяет судну удерживаться на наклонной поверхности волны для исключения заливаемости 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 курса и хода лагом к волне становится достаточно тяговых усилий на кормовом весле-плавнике.

Ввиду резкой качки этот режим плавания невозможен для крупных судов, не обладающих столь высокой относительной прочностью корпуса. По ходу лагом к волне требуются активные действия рулевого по удержанию курса вдоль волновых фронтов. При оплошности нос или корма судна могут «взлететь» на гребне волны, и в падении судно либо опрокинется, либо зачерпнет опасный поток воды внутрь корпуса.

Активное маневрирование с ходом по штормовой волне



Рис. 5. Обводы корпуса учитывают особенности штормового плавания по волне под управлением штормовых парусов и навесного руля

Русские поморы активным штормовым ходом по волне под северными ветрами уходили в укрытия в прибрежных шхерах, либо прятались в битых льдах на южных границах арктических льдов при ветрах южных. Весьма опасный ход, при котором долгий аврал на штормовой парусной вахте, холод и изнуряющая качка выматывали экипажи русских кочей (Рис. 5), угрожая непредвиденными опасностями ударов очередных гребней попутной или косой штормовой волны.

Форма корпуса и парусное вооружение корабля для активного хода по волне должны обладать особыми проектными и эксплуатационными особенностями:

- *Корпус судна должен иметь полные кормовые обводы без консольного транца, чтобы не допускался захват судна попутной волной. Кормовой руль заглубляется, его перо всегда ниже уровня подошвы волны для поддержания управляемости под воздействием гребней попутных волн, где поток воды обгоняет судно.*
- *Штормовой парус со смещением центра парусности в нос, что с полной кормой и обтекаемыми носовыми обводами служит управляемости с быстрым ходом по ветру и волне. Носовая оконечность без заостренного и килеватого форштевня, центр бокового сопротивлениямещен ближе к корме для сохранения устойчивости на штормовом курсе.*
- *Штормовой ход по волне подобен скоростной гонке с испытанием прочности парусного вооружения и предельным напряжением сил экипажа. В случае, если корпус все же захватывается волной и ставится лагом, то возможно опрокидывание при быстром развороте под волну, либо полоскание и срыв прямого паруса,*

Заливаемость верхних палуб при ходе или дельфинировании по волне не исключается, но угроза кормчему у румпеля и парусной команде на верхней палубе умерена ослабленным потоком в гребне попутной волны за счет хода судна вперед, что при должной грамотности и опыта экипажа способствует успеху столь лихого штормового маневрирования. В открытом океане и в зонах прибрежных мелководий ветровые волны могут неблагоприятно складываться с интенсивной инородной зыби, и активное управление штормовым ходом крайне затрудня-

ется ввиду непредсказуемости направления встречи с гребнями волн, и активное штормовое маневрирование становится чрезвычайно опасным.

Безопасное штормование носом на волну

На взволнованном море невозможно управиться с легкими веслами маленькой шлюпки. Порывистый штормовой ветер способен превратить паруса и рангоут в источник серьезной опасности не только для парусной команды, но и для самого корабля. И только кормовые веслоплавники на кормовом юте способны удержать корабль на курсе в условиях интенсивного волнения, а при усилении ветра – противостоять шквальным ударам ураганного ветра и гребней штормовых волн.

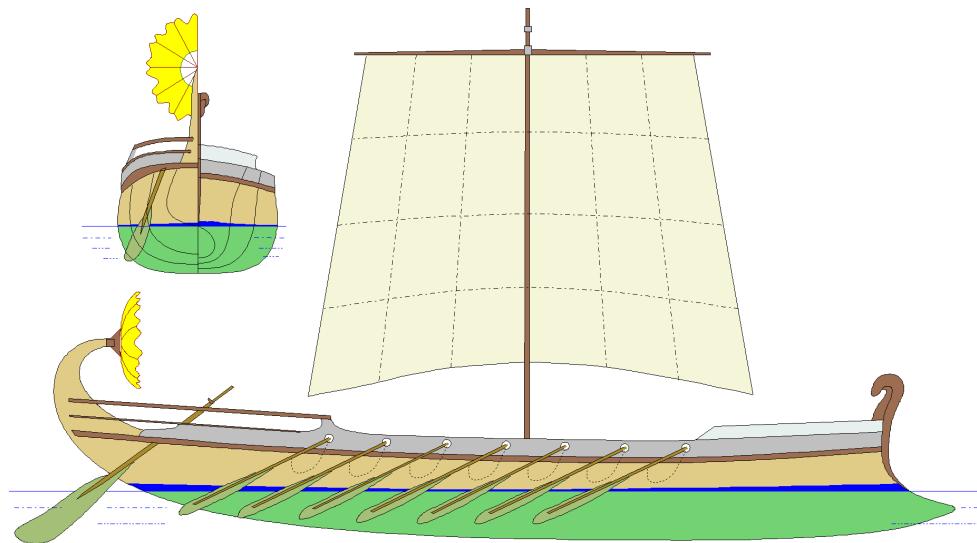


Рис. 6. Асимметричное относительно мидель-шпангоута парусно-гребное судно способно удерживать штормовой курс носом на волну, и маневрировать на волнении юлением кормовых весел-плавников

Всепогодное мореходство достигается с помощью общеархитектурных кораблестроительных решений для снижения угроз от воздействия на корабль гребней штормовых волн и шквальных ветров. Оптимальные инженерные решения применялись на древнем финикийском корабле (**Рис. 6**) со смешенным в нос центром величины и центром парусности – ближе к корме. Отсутствие плавникового ахтерштевня и заостренный бульбовый нос создают этому кораблю гидродинамические условия управляемого и пассивного штормования на курсе носом на волну. Такой корабль имеет относительно большую осадку и не может подходить к пологому необорудованному берегу (*разве что, кормой*

вперед), и отчасти утрачивает боевые возможности при общем снижении ходкости и маневренности на тихой воде.

Особенности формы корпуса, обеспечивающие безопасное штормование подобно флюгеру на курсе навстречу ветру и волнению:

- *Заостренный форштевень и носовой бульб благоприятствуют устойчивости на курсе навстречу волнению, при этом динамический центр качки и рыскания смещается ближе к форштевню, способствуя стабилизации продольной качки;*
- *Смещение в корму центра надводной парусности служит для восприятия силы ветра и приведении корабля носом на волну. Низкий бак принимает на себя гребни встречных волн, монолитность фронта которых нарушается носовым княвдигедом и бушпритом;*
- *Плавный подъем днища в корме и нависание кормовой оконечности высоко над водой раскрепощают рыскание. Кормовые веслаплавники создают любое направление тяги при маневрировании в свежую погоду, когда бортовые весла становятся неэффективными и опасными для гребцов, а парус используется только для придания кораблю свойств «штормового флюгера».*

Флот Великих географических открытий и освоения океанов

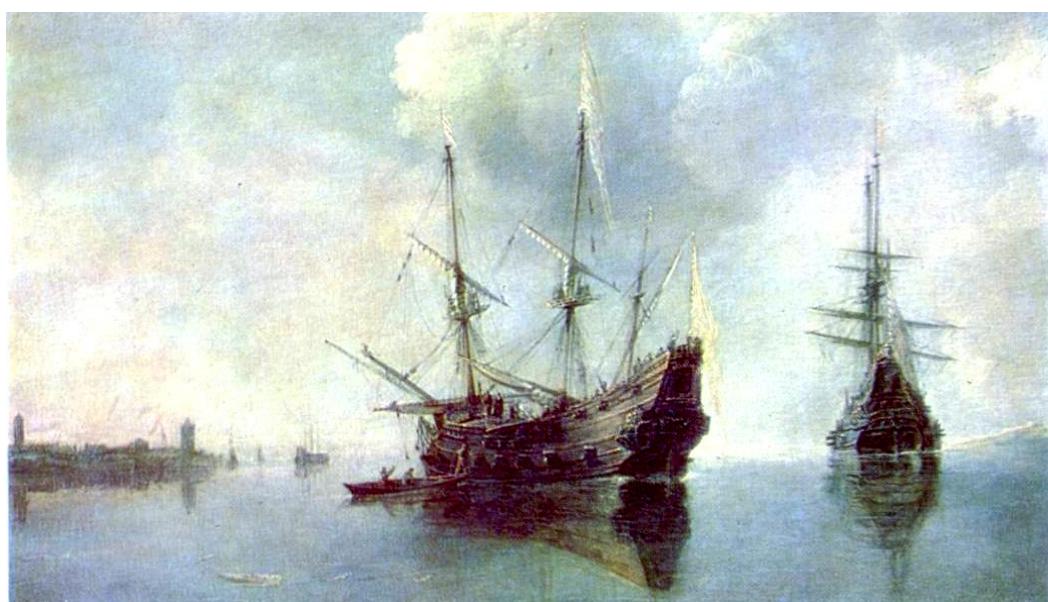


Рис. 7. «Два корабля на рейде» (Андрис Ван Эртфельт, 1590-1652 гг., Фландрия). Средневековые корабли эпохи Великих географических открытий

Всепогодное мореходство востребовало инженерное обустройство морских акваторий, для крупных судов углублялись фарватеры и строились крепкие причалы, устанавливались маяки и навигационные знаки для всепогодной проводки судов вблизи навигационных опасностей – прибрежных скал и отмелей.

Достижением средневекового кораблестроения по праву стали парусные галионы (Рис. 7), пришедшие из Испании XVI века. Галион оптимизирован для хода под парусами при свежих ветрах, и безопасного штурмования носом на волну при ураганном усилении ветра.

Основные тезисы о форме корпуса и общекорабельной архитектуре парусного корабля повышенной штурмовой мореходности:

- *Развитая кормовая надстройка смещает центр парусности в корму, а большая ширина и полнота носовых шпангоутов переносит центр величины в носовую часть корпуса. В шторм такой корабль подобно флюгеру держит курс носом на волну без хода;*
- *Плавниковый ахтерштевень и малая полнота кормовых шпангоутов позволили привести центр бокового гидродинамического сопротивления на одну вертикаль с центром парусности в средней части корпуса, что важно для устойчивого хода под парусами, а служит эффективности кормового навесного руля;*
- *Не воспринимающий волны завал бортов и разделение палубы поднимающимися в корму надстройками исключают одновременное попадание на палубу большого количества воды и сохраняют штурмовую остойчивость корабля. Завал борта предотвращает заливание палубы при ходе под парусами с большим креном, и снижает опасное для парусов штурмовое рыскание, так как корпус обретает симметрию относительно продольной оси;*
- *Кормовая надстройка средневекового корабля кажется парящей высоко над водой, что позволяет ветру приводить его корпус к ветру (т.е. носом на волну). В то же время бак очень низок, он видится тяжелым и низко вдавленным в воду, что способствует его безударной встрече с гребнями штурмовых волн в режиме неразрушающего обтекания, с приемом больших объемов воды на верхней палубе для демпфирования кильевой качки и сбережения рангоута от чрезмерных ускорений.*

Эффективность флота ограниченного района плавания

Средневековые государства средиземноморья нуждались в охране своих коммуникаций и защите побережья от непоседливых «жителей моря», обладавших всепогодными флотом с тяжелыми и тихоходными кораблями. В римской империи стали создаваться легкие быстроходные парусно-весельные корабли – либурны (средиземноморские галеры), обладавшие максимальной скоростью хода, и, как следствие, ограниченной штормовой мореходностью. Галеры могут ходить крутыми курсами на встречных ветрах, что расширяет возможности из боевого применения.

При крепком ветре на море невозможны вооруженные инциденты, а прибойные волны исключают возможность высадки десантов на открытом побережье. Галеры быстрыми ходами патрулируют побережье и морские коммуникации, а при усилении ветров уходят в порты-убежища и в прибрежные бухты, где экипажи могут противостоять неприятелю в составе береговых пограничных отрядов.

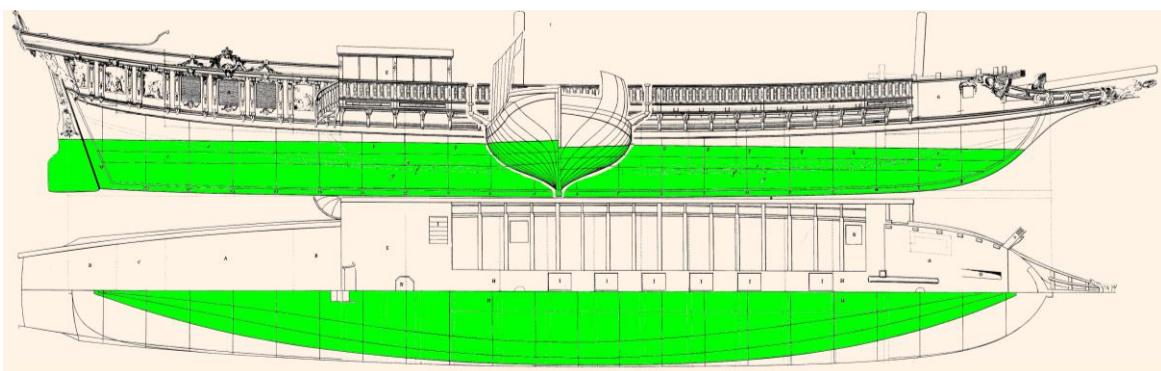


Рис. 8. Корпус галеры из альбома чертежей Фридерика Чапмэна «Architectura Navalis Mercatoria», 1768 г. Парусно-гребной корабль обладает хорошей ходкостью и маневренностью на свежих ветрах в прибрежных походах.

Специализированные быстроходные и маневренные корабли (Рис. 8) способны эффективно защищать побережье и противостоять тихоходным и зависящим от воли ветра и волн океанским парусникам, предназначенным к дальнему всепогодному плаванию в открытом море.

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

- На средиземноморской галере нет бульба, так как он не выдержал испытаний на ходкость и маневренность. Обводы корпуса плавные с заостренными ватерлиниями и сильным развалом бортов в оконечностях для поддержки абордажных высадок;
- Форма корпуса отвечает требованиям хода лагом к штормовой волне под управляемостью кормовых навесных рулей, при этом ход поддерживается косыми латинскими парусами;
- В носовой части корпуса большая полнота обводов для поддержания хорошей маневренности, а отсутствие бульба снижает стабилизацию носовой оконечности на встречном волнении;
- предельно малая высота бака и высокая кормовая надстройка создают условия пассивного штормования носом на волну без хода или под штормовым парусом на кормовой бизани;
- Удифферентовка на корму и плавниковый ахтерштевень приводят центр бокового сопротивления на одну вертикаль с центром парусности латинских парусов. Это необходимо для достижения устойчивости в движении произвольными курсами под парусами.

На примерах исторических весельных и парусных кораблей вполне просматривается системный подход к проектированию, как к связной системе инженерно-технических решений, отвечающих принципу непротивления силовому воздействию со стороны ураганного ветра и штормового волнения.

Гидродинамические особенности кораблей конца XIX – начала XX веков

Появление механического привода привносит в мореходность корабля возможность поддержания хода произвольным курсом при любом состоянии волнения. Требования к эффективности и экономичности мореходства быстро формализовались новыми «неписанными» правилами хорошей морской практики, и океанские корабли и суда всех стран мира обрели практически одинаковую внешнюю форму, подтверждая существование общемировых критериев целевого непротиворечивого проектирования флота для освоения океана в конкретных географических районах мирового океана.

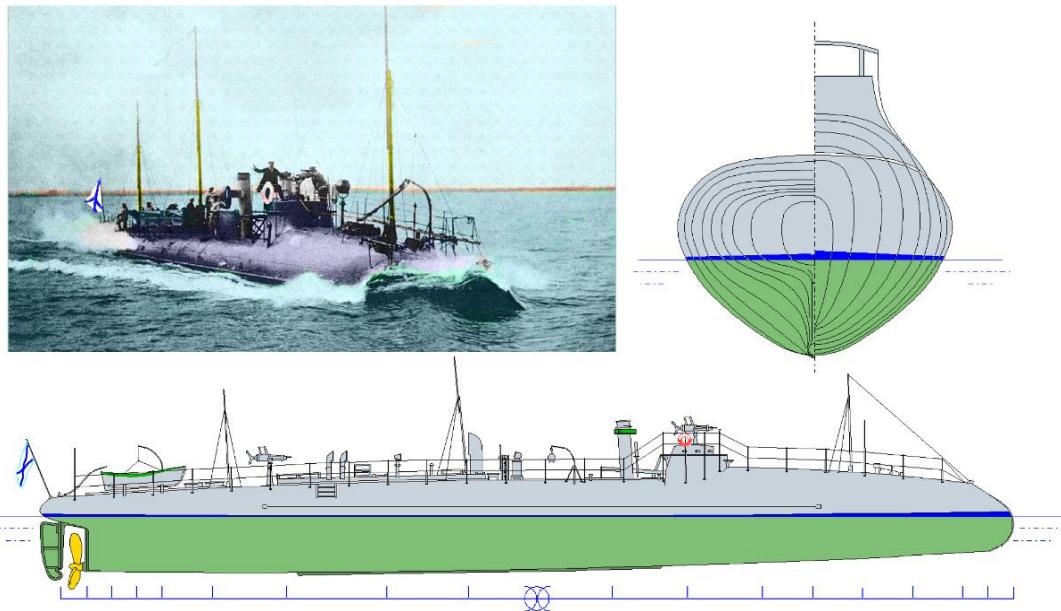


Рис. 9. Миноносец типа «Измаил». Корабль пользовался штормовым ходом в режиме прорезания волн.

В обводах корабля, построенного в начале XX века (Рис. 9), можно прочитать компромиссные решения между покорностью и противостоянием штормовой стихии моря:

- Таран-бульб и штормовой подрез форштевня служат стабилизации корпуса и сохранению устойчивости на курсе в условиях волнения. В отличие от весельных галер, на высоких скоростях хода по тихой воде такой бульб снижает волновое и отчасти полное сопротивление воды движению корабля;
- Заострение оконечностей и малая полнота надводных объемов в носу и в корме способствуют сохранению ходкости на волнении и благоприятно сказываются на уменьшении килевой качки и предотвращении слеминга;
- 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 рыхкания и потери хода при движении произвольным 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 зыбию;

- Зауженная ширина палубы и длинные продольные надстройки служат минимизации бортовой качки в условиях повышенной заливаемости верхних палуб в штормовом плавании;
- Достаточно низкий надводный борт и малая парусность надстроек способствуют управляемости и реальной маневренности на произвольных штормовых курсах.

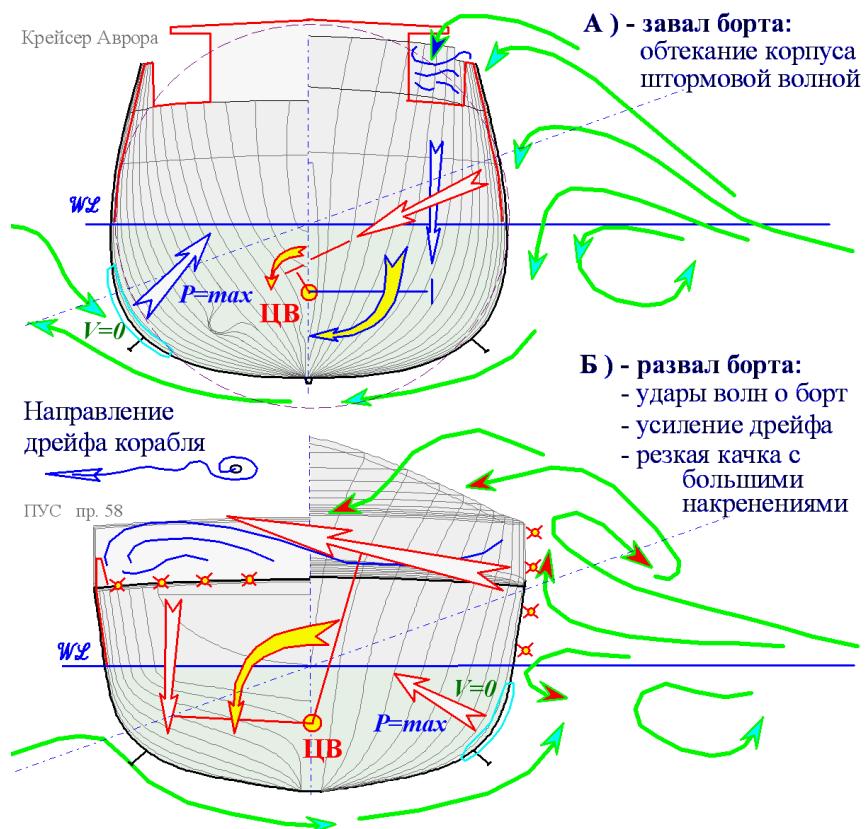


Рис. 10. Гидродинамическое воздействие морского волнения на корпус крейсера «Аврора» практически полностью компенсируется (А). Ракетный крейсер типа «Варяг» все гидростатические и гидродинамические силы, включая реакцию бортовых килей направляет на усиление опасных кренящих моментов и бокового дрейфа.

В судоводительской практике сохраняются традиции инженерной интерпретации распределения сил гидростатического всплытия и перепадов давления (*по закону Бернулли*) в динамике течений вблизи корпуса и у забортных успокоителей качки под воздействием морского волнения, по аналогии с тем, как это делается для винто-рулевого комплекса

при выработке решений о маневрировании с помощью пространственных образов и общепринятых в международной практике интерпретациях гидродинамических сил, эффективно применяемых на ходовых вахтах, в быстрых лоцманских объяснениях исполняемых маневров, так же как у морских спасателей и капитанов-наставников береговых служб при выработке конкретных наставлений в сложных, штормовых и аварийных условиях плавания [33].

Схема гидродинамического воздействия (Рис. 10), построенная на упоминаемых выше штурманских правилах, подтверждает экспериментальный эффект компенсации бортовой качки под воздействием предельно высоких гребней штормовых волн, которые безударно проходят через корпус и выходят с противоположного борта корабля без существенного искажения формы и интенсивности обрушающихся гребней.

На схеме А (Рис. 10) 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, Рис. 10), то и бортовые кили, и распределение давлений в подводной части корпуса будут усиливать кренящий момент под воздействием морского волнения.

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 отальной мореходности. В этом случае только знание законов гидродинамики, общая техническая компетентность и морская грамотность экипажа позволяют оперативно найти решение по изменению хода и курса корабля, или по перераспределению балласта и надводной парусности, чтобы оптимизированный корпус вернулся к проектному режиму штормового плавания и эффективному выполнению рейсовых заданий по предназначению корабля.

Можно отметить своеобразную особенность корпуса исторического корабля, в архитектуре которого за счет завала надводных бортов и

относительно большой осадки, реализован принцип непротивления волновой стихии. Такой корабль не защищает от интенсивного волнения шлюпки и другие мелкие суда, подходящие к нему с подветренного борта, так как устремляющиеся под корпус потоки энергии штормовых волн создают с подветренного борта столь же интенсивные течения и колебания уровня моря, как и с борта наветренного. Поэтому к «старым» кораблям шлюпки и грузовые баркасы не швартовались прямо к борту, а удерживались на некотором удалении с помощью забортных выстрелов.

К транспортным паровым судам, ввиду громоздкости и малой мощности их главных двигателей, не предъявлялось специальных требований по высокой ходкости в штормовом океане. Судно имело заостренный вертикальный форштевень и округлую нависающую над водой корму. В случае штормовой погоды и риска потери управляемости, судно могло уверенно ложиться на курс носом на волну и удерживаться на нем с помощью маломощных двигателей до улучшения погоды (*подобно древним галерам*).

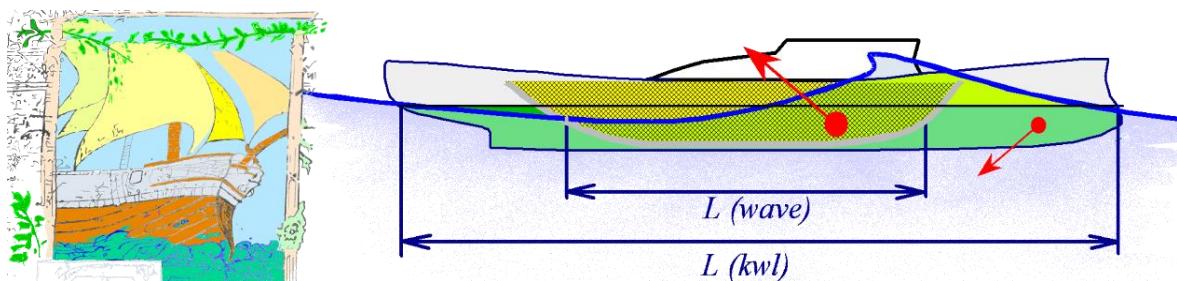


Рис. 11. Корабль Марко поло и схема воздействия на корабль встречного волнения, показывающая динамические особенности качки, связанные с формальным понятием волнообразующей – волновоспринимающей длины корпуса корабля при его взаимодействии с «правильной» прогрессивной штормовой волной. $L (kwl)$ - длина 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 склоновой и в средней частях корпуса, а также снижая реакцию корпуса за счет общего увеличения моментов инерции массы корпуса.

Аналогичные эмпирические заключения по наилучшей форме корпуса можно сделать и в отношении килевой качки (Рис. 11). Если на парусных кораблях носовая оконечность делалась очень полной в под-

водной 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. Наибольшую опасность килевая качка представляет при неконтролируемом изменении гидродинамических условий взаимодействия корпуса с морским волнением, отчего может случиться разрушительный бортовой или днищевой слеминг, или произойти жесткий захват корпуса гребнем девятого вала с быстрым разворотом корпуса относительно фронта штормовой волны и последующим опрокидыванием – брочингом.

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 процессов волнообразования корабля на различных скоростях хода на спокойной воде.

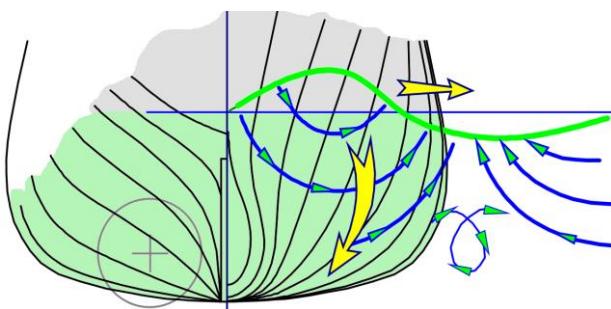


Рис. 12. Геометрическая интерпретация расходящейся корабельной волны с помощью вихря, рожденного вблизи судовой обшивки. Изображены линии тока в районе отрыва расходящейся волны от поверхности корпуса. Аналогичный процесс перераспределения волновых потоков происходит при прорезании корпусом гребней штормовых волн.

В носовой части корпуса происходит группирование (сложение) коротких расходящихся волн, если их собственной фазовой скорости недостаточно для свободного излучения от расходящихся носовых в-

терлининий. Рост высоты такой носовой подпорной волны происходит одновременно с увеличением её длины с сохранением крутизны стоячей волны Герстнера порядка 60° , в районе носовой скулы расходимость ватерлиний уменьшается и в момент отрыва от корпуса под обрушающимся гребнем корабельная волна становится прогрессивной с крутизной порядка 30° . Если в зоне отрыва перенаправить набегающий поток под днищевую скулу, поддерживая «закручивание» линий тока навстречу обрушающемуся гребню (Рис. 12), произойдет частичное гашение высоты расходящейся корабельной волны.

Аналогичный процесс происходит при взаимодействии корабля со встречным морским волнением, что создает динамическое перемещение сил всплытия на волнении ближе к средней части корпуса и усилиению вертикальной качки, что ослабляет килевую качку и способствует поддержанию ходкости, улучшает обитаемость для экипажа корабля. В носовой оконечности нежелательно утраивать развал надводных ветвей шпангоутов, способных напрямую воспринимать силовые нагрузки от гребней штормовых волн. Штормовая гидромеханика корабля должна ослабляться сложным взаимодействиями волновых потоков с закрученной поверхностью бортовой обшивки, или, по крайней мере – цельность фронта штормовой волны может разрушаться княвдигедом, как у исторических парусных кораблей

Эволюционные обобщения проектных решений

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 и очень прочными корпусами, что позволяет уверенно штормовать в открытом море при активном использовании (*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.

Реально – это три взаимосвязанные технические задачи: 1 - ходкость; 2 - стабилизация корпуса; 3 - безопасность плавания, которые

должны решаться применительно к реальным навигационным и географическим условиям судоходства.

Можно сформулировать основные требования к мореходным качествам судна по предпосылкам технической эволюции наиболее известных исторических кораблей и судов, и на их основе определить основные инженерно-технические решения для построения различных гипотетических моделей формы корпуса и общекорабельной архитектуры для достижения наилучшей штормовой мореходности:

- *Кораблям, исследовательским и рыболовным судам необходимы:*
 - а) стабилизация корпуса (как платформы для оборудования);
 - б) поддержание активного движения в любых погодных условиях (заданным курсом и скоростью);
- *Суда спасательной и патрульной службы обязаны держать ход произвольным курсом в любых погодных условиях, и по необходимости активно маневрировать в штормах и ураганных ветрах;*
- *Для транспортного судна, несмотря на малую мощность двигателей, удержание заданного курса, сохранение хода и достижение минимальности всех видов качки в условиях интенсивного волнения становится чисто экономическим требованием;*
- *Все корабли и суда должны удовлетворять **требованиям по безопасности штормового плавания без хода**, которое может обеспечиваться либо проектированием специальной формы корпуса и надстроек, либо установкой специальных судовых устройств: плавучих якорей и штормовых парусов*

Следуя проектным требованиям, в проекте нового корабля должны согласовываться следующие шесть взаимозависимых правил:

1. Смещение центра величины в нос до приведения на одну вертикаль или небольшого опережения динамического центра бокового сопротивления. Это обеспечит стабилизацию качки при движении на волнении, а без хода создаст предпосылки для приведения к ветру и безопасного штормования на курсе носом на волну;
2. Существенное уменьшение площади, а также поперечного и продольного моментов инерции действующей ватерлинии; заострение ватерлиний в оконечностях на всех уровнях, что требуется для

уменьшения силового воздействия штормового волнения и сохранения ходкости на дальних океанских переходах;

3. Исключение излишнего развала бортов, недопущение широкой и непрерывной верхней палубы (а также наклона вперед надводной части форштевня). *Во время штормового плавания это снимет проблемы чрезмерной качки и ударов волн по корпусу и палубам, и, тем самым, создает условия для активного управления ходом судна в условиях интенсивного волнения;*
4. Существенное уменьшение всех надводных объемов корпуса, и особенно – 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 (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 перпендикуляром теоретического чертежа. *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, перенос помещений внутрь гидродинамически обоснованного корпуса: "**Красота корабля определяется отсутствием на его борту ненужных вещей**". *Попутно снимаются ограничения выбора штормового курса по заливаемости или обледенению верхних палуб; решаются проблемы ветрового крена, и, за счет снижения метацентрической высоты корабль обретает требуемую плавность качки.*

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. Возможно, что 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.

Показательные кораблестроительные решения последних лет

Искусство проектирования современного корабля выходит из тени закрытых конструкторских кабинетов, чему способствует вседесущность 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 независимой разработки обоснованных технических предложений и требований к судостроению, к формированию новых наставлений мореплавателям и участию в практическом обустройстве региональной морской инфраструктуры.

Современные преобразования в морских науках представлены американскими корабелами, озвучившими концептуальные положения «целевого проектирования» на конференции STAB-2009, проходившей в Репино Ленинградской области [57]. В «целевом проектировании» обосновывается необходимость создания перспективного флота с участием опытных мореплавателей, берущих на себя ответственность за эксплуа-

тационную эффективность новых судов. Первым показательным примером [58] указывалась возможность постройки судно с предельно низкой стоимостью, если такое судно предназначается для одного единственного перехода под надежным прогнозом благоприятных погодных условий, например: с материка на Гавайские острова.

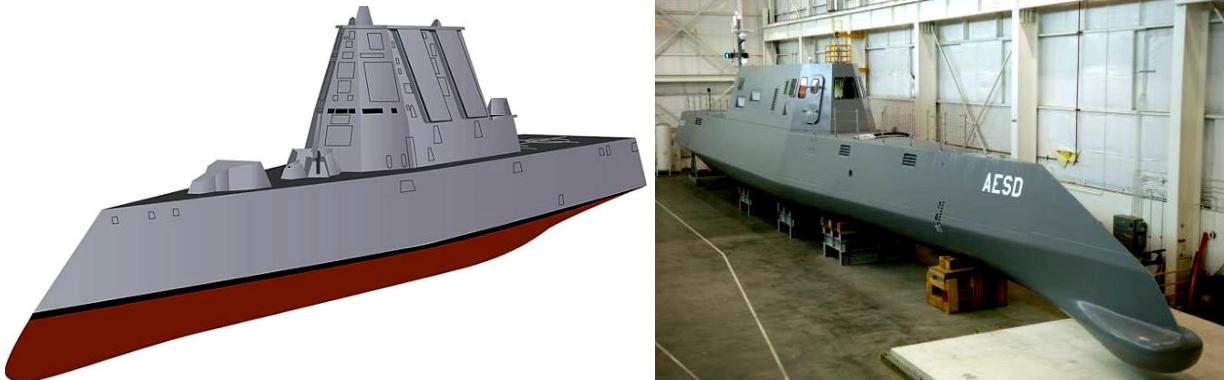


Рис. 13. Проектное изображение корабля “Zumwalt” (слева) и его модель в масштабе 1/4 (справа) [59]. Корабль способен держать 30-узловой ход с полной боеготовностью ракетных систем в любых погодных условиях.

Другой пример – корабль XXI века – эсминец DDG-1000 “Zumwalt” (Рис. 13), где учтены требования мореплавателей без оглядки на заскорузлые сертификационные ограничения.

Непротиворечивые проектные решения в судостроении служат становлению фундаментальных наук для развития кораблестроительных технологий, с возможностью экспериментного синтеза современного опыта практического мореплавания и хорошей морской практики в техническом окружении новейших информационных средств для интеграции экспериментальных результатов и реального опыта кораблевождения во всех условиях эксплуатации и поиска эффективных методов задействования возможностей корабля в дальних морских походах; – морские инженеры обретают законные основания для всестороннего обследования и обоснования ключевых аспектов эксплуатации, эффективности и жизнеобеспечения корабля, в том числе в боевых условиях, с пересмотром и обновлением сертификационных требований.



Рис. 14. 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.



Рис. 15. Вспомогательное судно Bourbon Orca. Норвегия, 2006 г.

В настоящее время строятся суда повышенной штормовой мореходности в Норвегии (Рис. 14-справа, Рис. 15) и Германии (Рис. 14-слева, Рис. 16), с использованием элементов формы корпуса (*в носовой оконечности*), аналогичных обоснованным в настоящей работе [60].



Рис. 16. Крупное прогулочное судно – моторная яхта класса А, Германия, Blohm&Voss, 2009 (www.charterworld.com)

Глава 1. Проектные изыскания и оптимизация судовых обводов для достижения всепогодной мореходности корабля

Признаком непротиворечивого проектирования и практической оптимизации в морской технике представляется однообразие инженерных решений, когда различия в общеархитектурных решениях, в форме обводов корпуса или общего расположении судна объясняется лишь эксплуатационными требованиями или особыми условиями района плавания. В хорошей морской практике это сводится к понятию красивого корабля, и означает, что на борту нет ничего лишнего, нет излишнего изобретательства в дельных вещах, и все элементы судна строго соответствуют лишь одному целевому предназначению.

Существующее многообразие проектных решений по общекорабельной архитектуре и форме корпуса современных судов свидетельствует лишь о существовании резерва неиспользованных возможностей в достижении эффективности всепогодного и штормового мореплавания, в обеспечении безопасного судовождения в сложных и ледовых условиях. Разнообразие проектных упущений может покрываться на море избытком мощности главных машин, и расточительными простоями в ожидании у моря хорошей погоды, безосновательно «оправдываемых» современной вездесущностью глобального гидрометеорологического сопровождения судоходства по береговым «заблаговременным» прогнозам опасных явлений на море, предсказываемых по картами дистанционного зондирования атмосферы и океанов из космоса.

Никак не оправданное отстранение инженеров-судоводителей и судовых механиков от участия в обосновании кораблестроительных решений привело к заметному снижению штормовой и ледовой мореходности новых кораблей и судов, и, как следствие, стало проявляться недоверием к мореплавателям в их морском деле, в том числе со случаями губительного перехвата береговыми службами чисто капитанских обязанностей в принятии решений на ходовом мостике.

Новый вычислительный инструментарий в корабельной гидромеханике, дополняющий опытную поверку проектных решений совместно с обновлением наставлений мореплавателям на экспериментальных

полигонах в открытом море, необходимы для привлечения реальных профессионалов и наставников морского дела к инженерным изысканиям при создании океанского флота для штормовых и ледовых условий мореходства на Дальнем Востоке России.

Форма корпуса корабля определяет особенности и методы эффективного кораблевождения

Краткий свод принятых обозначений:

$\{x, y, z\}$	<i>Координаты в связанной с корпусом системе отсчетов (СК);</i>
$\{x_0, y_0, z_0\}$	<i>Точка, лежащая на поверхности корпуса</i> [м];
$\{\xi, \eta, \zeta\}$	<i>Координаты в невозмущенной на бесконечности жидкости;</i>
$\{\xi_0, \eta_0, \zeta_0\}$	<i>Точки на свободной поверхности вззволнованной жидкости;</i>
\vec{r}	<i>Отклонение частицы жидкости от невозмущенного состояния</i> [м];
V_0	<i>Скорость набегающего потока (скорость поперечной волны)</i> [м/с];
$F_n = V / \sqrt{g \cdot L}$	<i>Число Фруда (скорость относительно поперечной волны);</i>
$q(\vec{r}) \equiv V_0 \cdot q$	<i>Интенсивность распределенных по поверхности корпуса волновых источников</i> [м/с];
$\lambda/L = 2\pi \cdot F_n^2$	<i>Отношение длины поперечной волны, излучаемой кораблем к длине его корпуса, выраженное с помощью числа Фруда;</i>
$k = \frac{g}{V_0^2 \cdot \cos^2 \vartheta}$	<i>Частота формы волны</i> [1/м];
$\angle \vartheta = \arccos \frac{V}{V_0}$	<i>Фазовый угол Кельвина – направление излучения элементарной волны в спектре углов</i> $\angle \vartheta \in [0 \div 90^\circ]$;
$C = V_0 \cdot \cos \vartheta$	<i>Скорость излучаемой корпусом фазовой волны</i> $\angle \vartheta$ [м/с];
$\sigma = \frac{g}{V} = \sqrt{g \cdot k}$	<i>Частота волновых колебаний (во времени)</i> [1/с];
$\sigma^2 = g \cdot k = 2\pi \cdot g / \lambda$	<i>Дисперсионное соотношение для волн на глубокой воде;</i>
$\zeta_w(\vec{r})$	<i>Аппликаты волнового профиля</i> [м];
$\lambda = 2\pi / k = g \cdot T^2 / 2\pi = C^2 \cdot 2\pi / g$	<i>Соотношение длины, периода и скорости гребней корабельных волн</i> [м].

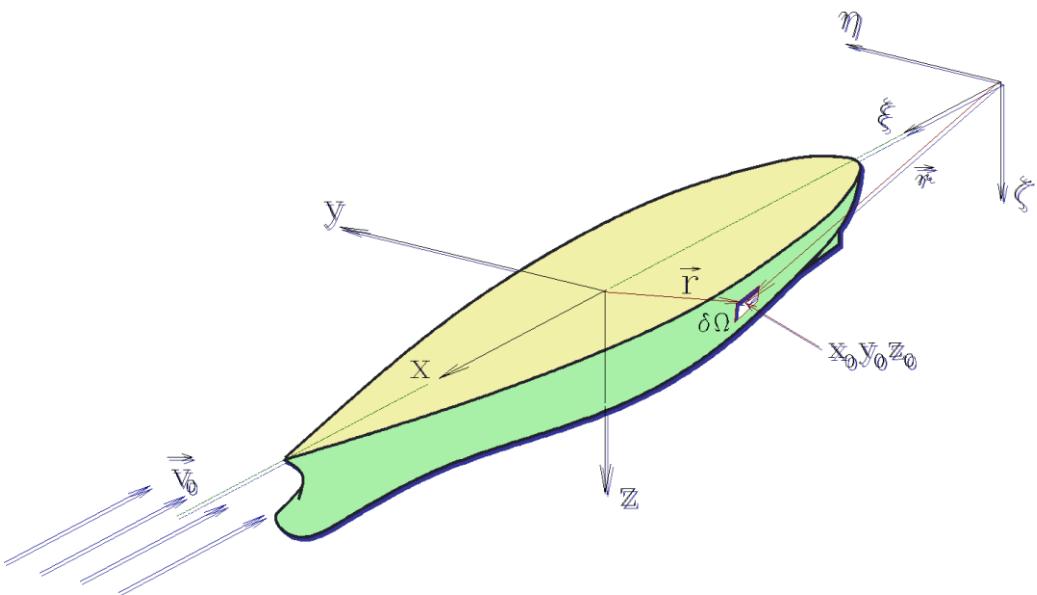


Рис. 17. Система корабельных координат

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 волн позволяет 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:

$$V \approx 1.25 \cdot \sqrt{(\lambda/L) \cdot L} = 1.25 \cdot \sqrt{\lambda} \quad [m/c].$$

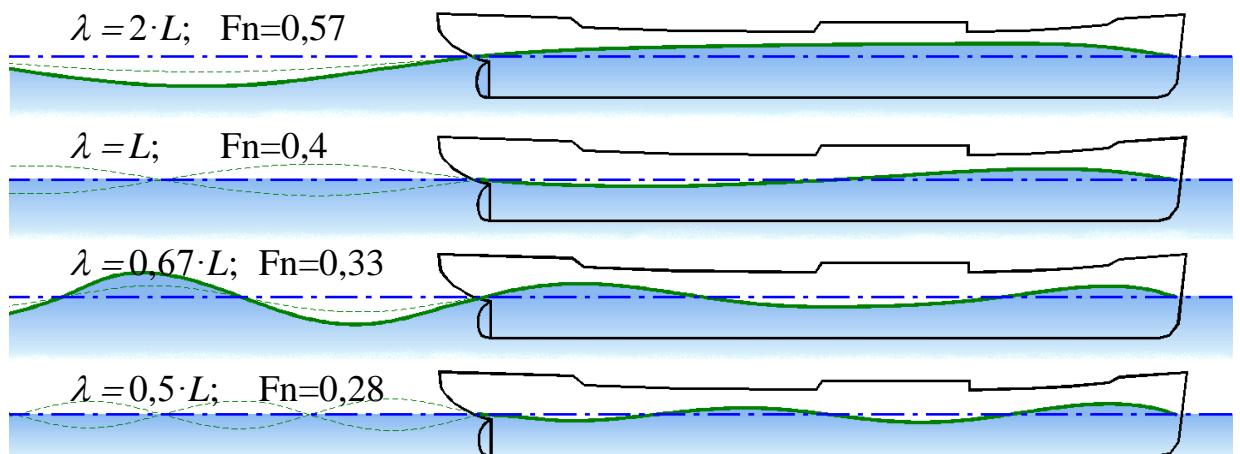


Рис. 18. Волнообразования при различных скоростях хода судна.

В качестве безразмерного и независимого от длины корпуса параметра, характеризующего волнобразование на различных скоростях хода корабля, принято число Фруда: $Fn = V/\sqrt{g \cdot L}$, которое связано с

отношением длины поперечной волны к длине корпуса корабля:

$$(\lambda/L) = 2\pi \cdot Fn^2, \text{ или } Fn = \sqrt{\frac{\lambda}{2\pi \cdot L}} \approx 0.4 \cdot \sqrt{(\lambda/L)}.$$

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 уменьшается со значения $Fn \approx 0,4$ до $Fn \approx 0,32\text{--}0,36$, соответствующий рост волнообразования на скорости хода при $Fn \geq 0,57$ обычно соотносят с $Fn \geq 0,5$.

К сожалению, величину волнообразующей длины корпуса довольно трудно установить однозначно, так как она зависит от изменения скорости хода корабля. Рис. 18 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. Тем не менее, эффект столь неблагоприятной интерференции носовой и кормовой систем корабельных волн частично может компенсироваться построением оптимальных обводов корпуса, ключевым элементом которого видится завал бортов на уровне действующей ватерлинии в средней части корпуса.

Для оценки сопротивления воды движению корабля обычно пользуются величиной коэффициента сопротивления C_w , отнесенного к квадрату скорости и площади смоченной поверхности (подводной части) корпуса.

$$R_w = C_w \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2} \cdot S$$

где: R_w – волновое сопротивление [Н]; ρ – плотность жидкости [$\text{кг}/\text{м}^3$]; V – скорость хода судна [$\text{м}/\text{с}$]; S – площадь смоченной поверхности корпуса [м^2].

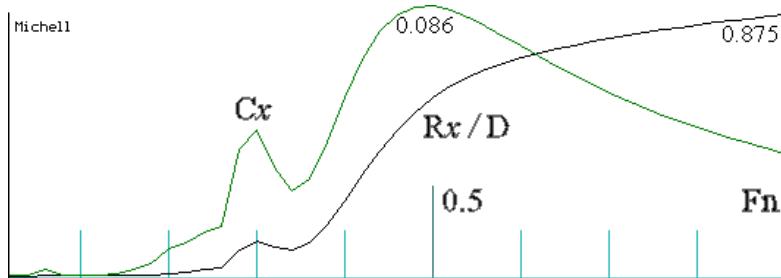


Рис. 19. Характерная форма и числовые оценки расчетных кривых волнового сопротивления для хорошо обтекаемого корпуса корабля. C_x – коэффициент сопротивления; R_x/D – удельное сопротивление. Хорошо видны экстремумы сопротивления при неблагоприятной интерференции носовой и кормовой систем поперечных волн, возникающей на скоростях хода при $F_n \approx 0,5$ (0,57) и $F_n \approx 0,3$ (0,33). Полного гашения волнового сопротивления при $F_n \approx 0,26$ (0,28) и $F_n \approx 0,35$ (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 (Рис. 19), отнесенного к водоизмещению корабля: R_w / D , где D – водоизмещение [кг]. Если тихоходное судно ($F_n \leq 0,2$) обладает хорошо обтекаемым корпусом, то его волновое сопротивление будет пренебрежимо малым.

1.1. Проектные особенности обводов корабля, их влияние на интенсивность волнообразования и силовое воздействие штормовых волн в рамках теории Мичелла

Полагая справедливым принцип взаимности корабельного волнообразования и силового воздействия на корпус корабля со стороны интенсивного штормового волнения, рассмотрим оригинальный метод Мичелла для вычисления волнового сопротивления корабля, включая в рассмотрение высокие скорости с длинами корабельных волн соизмеримыми

мыми со штормовыми, ожидаemyми в акватории предназначения перспективного корабля.

В рамках теории волнового сопротивления Мичелла вполне возможна интерпретация всех расчётных величин в естественных физических размерностях и сопоставимых масштабах, что послужит решению значимых практических задач:

- наглядная геометрическая и физическая интерпретация с обоснованием корректности всех вычислительных процессов и моделируемых явлений гидромеханики;
- контроль кинематического и реологического состояния жидкости для адаптации вычислительных моделей гидромеханики на границах гравитационного разрыва (свободной поверхности) вблизи судовой обшивки;
- задействование гибридных моделей гидромеханики корабельного волнообразования с применением аналитических решений, асимптотических приближений и эмпирических экстраполяций в зонах нарушения аппроксимационных критериев.

Интерпретация расходящихся корабельных волн

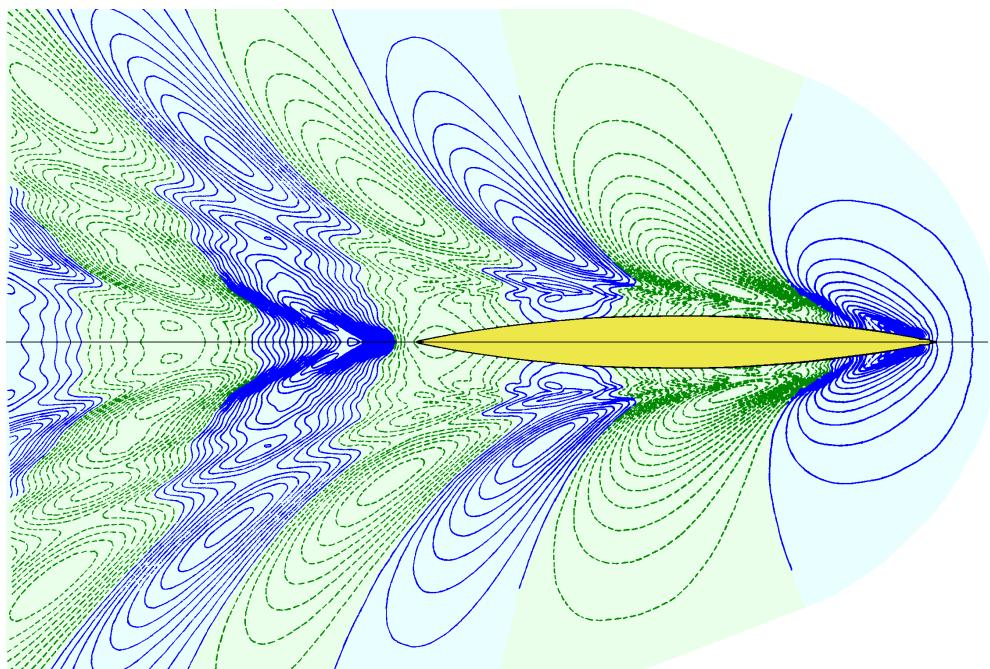


Рис. 20. Корабельное волнообразование образуется спектром расходящихся волн в стационарной картине волновых пакетов с гребнями в торцах поперечных волн. Скорость хода $F_n = 0,316$.

Расходящиеся от корпуса корабельные волны проявляются как свободные волны на глубокой воде, они обладают ярко выраженными групповыми свойствами (*скорость распространения волнового возмущения в целом два раза медленнее фазовой скорости каждой из волн, образующих волновой пакет*).

Огибающая угла расхождения корабельных волн (Рис. 20) не зависит от скорости хода корабля и составляет угол порядка $20^{\circ}42'$. В 1887 Кельвином получено решение для корабельных волн от точечного источника на поверхности воды, угол разворота гребней расходящихся волн составил $35^{\circ}16'$ [Дж.Ньюмен, 1985].

Минимизация 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 скучловые обводы в носовой и кормовой частях корпуса успешно решают задачу минимизации 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 гидродинамической компенсации бортовой качки, возникающей под воздействием штормовых волн в широком диапазоне периодов.

Высказанные заключения являются исходными проектными условиями, выполнение которых безусловно необходимо, но отнюдь не достаточно для достижения приемлемой штормовой мореходности корабля. Так, к примеру, плавные обводы и выравнивание скучловых потоков

обеспечивается корпусом в форме «двойного клина» (Рис. 21), показывающего превосходные ходовые характеристики на тихой воде, однако в штормовых условиях чрезмерная асимметрия кормовой и носовой части корабля значительно усиливают все виды качки и рыскания.

До настоящего времени не введены в практическое использование достаточно обоснованные математические модели корабельного волнобразования, кроме интеграла Мичелла, которые могли бы использоваться для уверенного проектирования обводов корпуса. Прямое задействование этого интеграла в качестве функционала для выбора оптимальной формы корпуса не приводит практически приемлемым 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» (Рис. 21), так и различные пульсирующие формы ватерлиний или гиперболизованные размеры носового бульба.



Рис. 21. Крейсер «Москва» имеет обводы в форме двойного клина и развал бортов вдоль всего корпуса корабля.

Тем не менее, решение Джона Генри Мичелла представляет не только исторический интерес. Углубленный анализ промежуточных выкладок при получении интеграла Мичелла необходим для анализа особенностей излучения корабельных волн совместно с интерпретацией силового воздействия штормовых волн на корпус корабля, что важно для проектного синтеза комплекса технических решений и оптимального построения судовых обводов и внешнего облика корабля повышенной штормовой мореходности.

Формула Мичелла для волнового сопротивления судна

Традиционная или историческая теория волнового сопротивления корабля строится на предположении о малых возмущениях потока с помощью источников $q(x_0, z_0)$, плавно распределяемых на элементарных площадках $d\Omega$ по всей поверхности обшивки корпуса корабля. Интенсивность распределенных источников вполне корректно оценивается с помощью локальной скорости поперечного течения для оконтуривания ватерлиний на заданной скорости хода судна: V_0 :

$$q = V_0 \cdot \frac{\partial y}{\partial x} \quad [m/c] \quad (1)$$

где: $y(x_0, z_0)$ – ординаты корпуса.

Таким образом в каждой точке поверхности моря x, y сопоставляется фазовый отсчет $\omega = (x - x_0) \cdot \cos \vartheta + (y - y_0) \cdot \sin \vartheta$, для корабельной волны, излучаемой корпусом корабля на заданной частоте $\sigma^2 = g \cdot k$ в направлении ϑ . Определим энергию, распределенную по взволнованной поверхности моря, которая приходится на образование системы корабельных волн с длиной $\lambda = 2\pi g / \sigma^2$:

$$E = \frac{1}{2} \rho \cdot g A^2 \lambda = \pi \rho V_0^2 A^2 \cos^2 \vartheta, \quad [H/m] \quad (2)$$

Корабельное волнообразование происходит в спектре длин волн: $\lambda \in [0 \div \Lambda = 2\pi V_0^2 / g]$. Скорость переноса волновой энергии на глубокой воде определяется через групповую скорость пакета, состоящего из фазовых волн: $V_g = \frac{1}{2} V = \frac{1}{2} V_0 \cos \vartheta$.

Принимая условие стационарности картины волнообразования относительно движущегося корабля делаем заключение, что фазовые профили всех излучаемых волн отображаются на диаметральную плоскость корпуса как волны одинаковой длины (Рис. 22). Это означает также, что пакеты волн любой длины $\lambda(\vartheta)$ содержат одинаковое количество пространственных фаз по волнообразующей длине корпуса.

Мощность, затрачиваемая кораблем на образование волн, излучаемых в направлении $\angle \vartheta$, выражается следующим соотношением:

$$P(\vartheta) = \frac{\pi}{2} \rho V_0^3 A^3 \cos^3 \vartheta : \quad (\times \delta \vartheta)$$

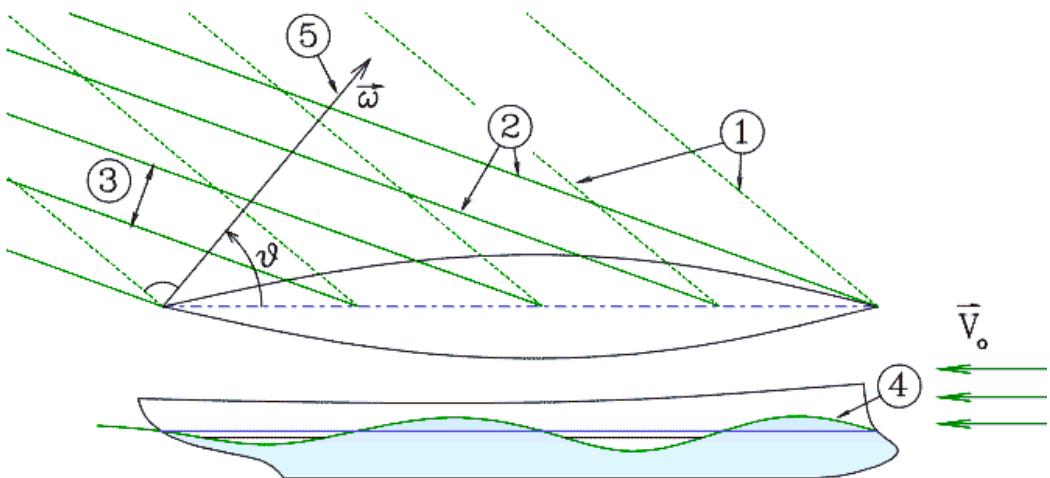


Рис. 22. Две системы расходящихся от корпуса корабельных волн: 1-я имеет фазовые характеристики на момент зарождения корабельной волны с частотой формы $k = f(\vartheta)$; 2-я система волн образуется в результате формирования групповых структур распространения волновой энергии. (1) Исходные линии фронтов фазовых волн, излучаемых со скоростью $V = V_0 \cos \vartheta$; (2) Огибающая групповых структур корабельных волн; (3) Полосы оконтуривания пакетов с исходными фазовыми характеристиками; (4) Отметка волновой поверхности на диаметральной плоскости корпуса корабля; (5) Направление излучения с фазовыми отсчетами ω на частоте σ в направлении ϑ .

Волновое сопротивление от всего спектра корабельных волн:

$$R_x = \frac{\pi}{2} \rho V_0^2 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} A(\vartheta) \cos^3 \vartheta d\vartheta. \quad (3)$$

Вычисление реакции R_x в качестве интеграла по амплитудам $A(\vartheta)$ всего спектра корабельных волн называют формулой **Хавелока** [Ньюмен, 1985]. Амплитудную функцию $A(\vartheta)$ на свободной поверхности жидкости определим по фазовым отсчетам излучаемых волн по всей поверхности корпуса:

$$A(\vartheta) = \frac{g}{2\pi V_0^2 \cos^3 \vartheta} \left| \int_{\Omega} q \cdot e^{k(-z_0 + i\omega)} d\Omega \right| \quad (4)$$

После подстановки амплитудной функции (4) в формулу Хавелока (3) может быть получен уточненный аналог интеграла Мичелла, расширяемый для случая реальной широкой формы корпуса связывается с разработками Н.Е. Кочина.

$$R_x = \frac{\rho g^2}{4\pi V_0^2} \int_0^\pi \left| \int_{\Omega} q e^{k(-z_0 + i\omega_0)} d\Omega \right|^2 \frac{d\vartheta}{\cos^3 \vartheta}, \quad (5)$$

где $q(x, z) \approx \frac{\partial y(x, z)}{\partial x}$ – интенсивность источников на поверхности корпуса судна; $\omega_0 = x_0 \cos \vartheta$ (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 (4). Это позволит выявить области с нарушениями физических законов реального волнообразования, которые допускаются в случае прямого интегрирования выражения для волнового сопротивления корабля (5).

Используем описание волнового поля в связанной с корпусом системе координат:

$$\mathbf{r}_w = \frac{ig}{2\pi V_0^3 \cos^3 \vartheta} e^{k \cdot (-z - z_0 + i\omega)} \cdot \mathbf{q} \cdot V_0.$$

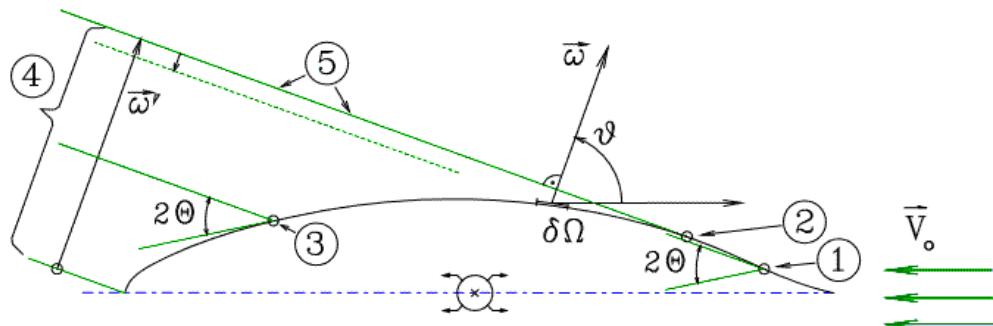


Рис. 23. Распространение и интерференция фазовых волн. (1) Точка, в которой невозможно излучение носовой расходящейся волны с данной фазовой частотой; (2) Точка, в которой корабельная волна отрывается от корпуса, до этой точки волны заданной частоты складываются в гребень; (3) Точка, в которой нарушается 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 данной фазовой частотой

Высота волны на свободной поверхности жидкости ($z=0$), излучаемая с единичной площадки на обшивке корпуса:

$$A(\vartheta, x_0, y_0) = V_0 \mathbf{q} \cdot |\mathbf{r}_w|: d\Omega = 1,$$

$$A(\vartheta, x_0, y_0) = \frac{q(x_0, y_0)}{\lambda \cos \vartheta} e^{-kz}. \quad (6)$$

$$d\Omega = dx_0 dy_0 \sqrt{1 + y_x^2 + y_z^2};$$

$$\Theta = \frac{\pi}{2} - \vartheta - \text{угол фронта.}$$

Каждый элемент обшивки корпуса создает на свободной поверхности жидкости приращение амплитуды корабельной волны, фронт которой простирается вдоль линии, обозначенной на рис. 23 символом: ⑤¹, при этом фаза волны не меняется вдоль фронта, а амплитуда вычисляется по формуле (6).

Рассматривая точки на линии $\bar{\omega}'$: ④ в соответствие с точками на поверхности корпуса:

$$\bar{\omega}' = x_0 \cos \vartheta + y_0 \sin \vartheta, \quad (7)$$

будет учитываться, что вектор $\bar{\omega}'$ условно перемещается в направлении распространения фазовой волны, что аналогично интерпретируется по формуле (7) как отсчитываемый от начала координат: ($x=0, y=0$). Записывая результатирующую амплитудную функцию для фазовых волн как результат интерференции на линии $\bar{\omega}'$:

$$A(\vartheta, z_0) = \left| \int_{\omega'} A(\vartheta, x_0, y_0) \cdot e^{ik\omega'} d\omega' \right|. \quad (8)$$

Из условия стационарности картины волнообразования любая система фазовых волн единообразно проецируется на направление движения корабля. Заменим параметр $d\omega$ на dx , где пересчет ω' под экспонентой в формуле (7) определяет фазу волны в интерференционном интеграле (8).

$$A(\vartheta, z_0) = \frac{-e^{-kz_0}}{\lambda \cos \vartheta} \left| \int_{x_0} q(x_0, z_0) e^{ik\omega'} dx \right|. \quad (9)$$

Амплитудная функция от всего корпуса:

$$A(\vartheta) = \frac{1}{\lambda \cos \vartheta} \left| \iint_{\Omega} q(x_0, y_0) e^{k(-z_0 + i\omega)} d\Omega \right| \quad (10)$$

$$\omega' = x_0 \cos \vartheta + y_0 \sin \vartheta; \quad d\Omega = \sqrt{1 + y_x^2 + y_z^2} dx dz$$

Из геометрического построения формулы (10) можно отметить отсутствие корректности при включении в интерференцию волн, излучае-

¹ Здесь и далее цифры в кружочках означают позиции на рисунках

мых с участка корпуса от форштевня до точки ② и от точки ③ до ахтерштевня (*по рис.23*).

Особенности корабельного волнообразования

Рассмотрим поле скоростей в плоскости распространения фазовых волн. Пусть излучение $q(x_0, z_0)$ ведется с одной элементарной площадки на поверхности корпуса $d\Omega$, тогда:

$$V_z = V_0 q \cdot \frac{k}{\lambda} e^{-k(z+z_0)} \cos(k\omega); \quad (11.1)$$

$$V_\omega = V_0 q \cdot \frac{k}{\lambda} e^{-k(z+z_0)} \sin(k\omega). \quad (11.2)$$

Траектории частиц жидкости в корабельном волнообразовании (11.1, 11.2) могут рассматриваться в рамках модели трохоидальных волн Герстнера конечной амплитуды [Шебалов, 1984, Егоров, 1974]. Такое приближение вполне соответствует реальным свойствам корабельных волн, если считать V как локальную скорость частицы жидкости, т. е. в Лагранжевом представлении течения.

1. Пусть частицы жидкости участвуют в движении по круговым траекториям [Войткунский Я.И., 1982] со скоростью, зависящей от апликаты z :

$$V_p = V_0 q \frac{k}{\lambda} e^{-k(z+z_0)}. \quad (12.1)$$

$$\text{Угловая скорость: } \sigma = \frac{g}{V_0 \cos \vartheta}.$$

$$\text{Локальный радиус траектории: } r_l = \frac{V_p}{\sigma} = V_0 \cdot V \cdot q \cdot \frac{k}{g\lambda} e^{-k(z+z_0)} \quad (12.2)$$

2. Из условия стационарности потока следует, что линии тока и траектории частиц совпадают. Это является условием перехода к Лагранжевым координатам, где всегда рассматриваются траектории частиц жидкости, и тогда ранее полученные уравнения (11) 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 ближайшего окружения частицы жидкости,

а при утверждении неизменности дисперсионного соотношения $\sigma^2 = g \cdot k$, как следствие становятся справедливыми и ключевые выводы из линейной теории волн (*волны на свободной поверхности под действием сил гравитационной природы*).

Как показано в работе А. Н. Шебалова [1984], такая интерпретация поля скорости (11) полагает его вихревым:

$$\left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial \vec{r}} \right] = - \frac{2\sigma}{1 - k^2 R^2 e^{2kz'_0}} \frac{k^2 R^2 e^{2kz'_0}}{e^{2kz'_0}},$$

$$R = V_0 \cdot V \cdot q \cdot \frac{k}{g\lambda}.$$

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 в следующем виде:

$$\vec{r}_w = \frac{1}{2} A \cdot e^{-k(z+z_0)}.$$

В трохоидальной волне локальная траектория частиц задаётся дугой окружности с радиусом r_w , зависящем от аппликаты z , для данной частицы жидкости z_w и от амплитуды волны на поверхности $A = \frac{2}{\lambda} \frac{q}{\cos \theta}$.

Скорость движения элементарных частиц определяется через произведение частоты колебаний и радиуса дуги траектории:

$$V_r = \sigma \cdot r = V_0 q \frac{k}{\lambda} e^{-k(z+z_0)} = \frac{q}{V} \frac{A}{2} e^{-k(z+z_0)}.$$

Скорость частиц растет 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 $V = V_r$:

$$\frac{q}{V_0^2} \frac{A}{2} e^{-kz} = 1 = \frac{kA}{2} e^{-kz}.$$

В предельном случае трохоидальная теория, путем численного (*приближенного*) решения полученного соотношения, дает константу: $A \cdot k \approx 1.134$, при: $z = A/2$, или с учетом снижения амплитуды на подошве волны получается: $\lambda/h \approx 8.38$, 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.

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 локализуются до элементарных участков судовой обшивки:

$$R_X = \frac{\rho g^2}{4\pi \cdot V_0^2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left| \int_{\Omega} q(x_0, z_0) e^{k \cdot (-z_0 + i\omega_0)} d\Omega \right|^2 \frac{d\vartheta}{\cos^3 \vartheta}; \quad (5')$$

или: $R_X = \frac{\pi}{2} \rho V_0^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} A^2(\vartheta) \cdot \cos^3 \vartheta d\vartheta; \quad (3')$

и: $A(\vartheta) = \frac{1}{\lambda \cos \vartheta} \left| \int_{\Omega} q(x_0, y_0) \cdot e^{k \cdot (-z_0 + i\omega_0)} d\Omega \right|, \quad (10')$

где: $q \equiv \frac{\partial f}{\partial x}$; $\omega = x_0 \cos \vartheta + y_0 \sin \vartheta$; $k = \frac{g}{V_0^2 \cos^2 \vartheta}$; $\lambda \in \left[0 \div \Lambda = 2\pi \frac{V_0^2}{g} \right]$.

Интеграл Мичелла представляет трансформацию падающих на корпус волн в диапазоне длин λ от 0 до Λ , и представляется как своеобразная деформация внешних морских волн в процессе их отражения от борта корабля. Принятие такого объяснения корабельного волнообразования соответствует выводу о том, что минимизация волнового сопротивления

тивления на всех скоростях хода одновременно минимизирует силовое воздействие на корабль со стороны штормового волнения.

В построении численных решений необходимо учитывать и по возможности корректировать результаты вычислений по теории Мичелла с привлечением эмпирических моделей волнообразования и аппроксимаций свойств волн Герстнера, как моделей реальных морских волн конечной амплитуды.

Оценка энергии волнообразования:

$$E = \rho \cdot g \cdot A^2 / 2. \quad (13)$$

В основу энергетической зависимости (13) закладывалось допущение о том, что с элементарной площадки на поверхности корпуса корабля излучаются “малые волны”. Но амплитудная функция $A(\vartheta)$ (10) описывает волнообразование от всего корпуса, т.е. $A(\vartheta)$ определяет реальные корабельные волны с большой амплитудой, и более того при $\vartheta \rightarrow \pi/2 \Rightarrow A \rightarrow \infty$.

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 излучения волн от корпуса зависит от длины, 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 не описываются с помощью исходных волновых уравнений.

Интерпретация вычислений по формулам (3) и (10) на основе геометрических особенностей формирования трохоидальных волн Герстнера, сводится к системе эвристических правил для учета действия высокочастотных волн: $k = \frac{g}{V_0^2 \cos^2 \vartheta}$, не способных оторваться от корпуса.

Условие излучения свободных корабельных волн

Источник расходящихся корабельных волн концентрируется вблизи оконечностей корабля до тех пор, пока фазовая скорость свободного движения гребня не превысит скорость движения элемента обшивки корпуса относительно неподвижной жидкости в том же (поперечном) направлении:

$$V \geq V_0 \cdot \left| \frac{\partial y_0}{\partial x} \right| \cdot \frac{1}{\cos \vartheta} \approx V_0 \cdot |q| \cdot \frac{1}{\cos \vartheta}, \quad (14)$$

где фазовая скорость корабельных волн определяется как: $V = V_0 \cos \vartheta$.

При интерпретации решений Мичелла рассмотрим применение эмпирических или специальных асимптотических численных методов, основанных на инженерных подходах как для уточненного расчета волнового сопротивления, так и для построения картины корабельного волнообразования, и, соответственно, оптимизации формы корпуса по критериям минимизации энергии излучаемых (трансформируемых) корабельных волн на различных скоростях хода.

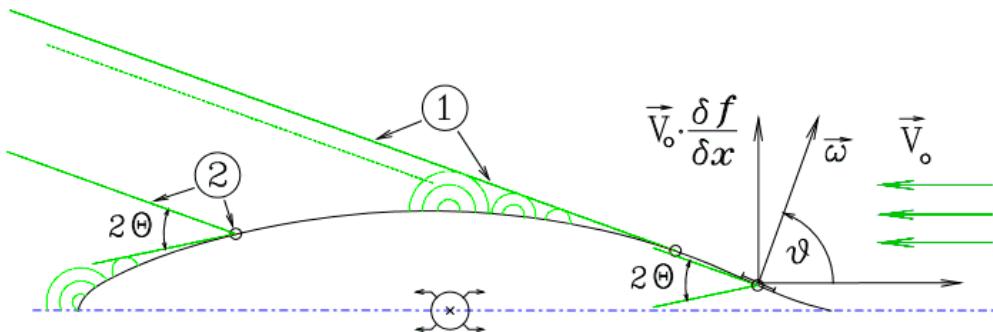


Рис. 24. Геометрическая интерпретация условий формирования фронта расходящейся волны.(1) Условием формирования корабельной волны является сложение амплитуд волновых импульсов, излучаемых одновременно из различных точек обшивки корабельного корпуса; (2) Волна с заданной «частотой формы» не может быть сформирована, если касательная к поверхности корпуса не попадает в сектор $2\cdot\Theta$.

Пусть вычислительной задачи не рассматривается влияние угла входа ватерлиний на направление распространения расходящихся волн (Рис. 24), что означает пренебрежение эффектом перераспределения амплитуд по направлению излучения корабельных волн (по угловому параметру ϑ), обусловленным влиянием реальной ширины корпуса судна.

Тогда: $A(\vartheta) = \left| \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} A(\vartheta, x_0) e^{ik\omega_0} dx_0 \right|, \quad (15)$

если: $V_0 \cos^2 \vartheta \left| V_0 \frac{\partial f}{\partial x} \right| \approx |V_0 q|,$

а также: $A(\vartheta) = \left| \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} A(\vartheta, x_0) e^{-k\omega_0^*} dx_0^* \right|, \quad (16)$

при условии: $V_0 \cos^2 \vartheta < |V_0 q|$. Здесь x^* отсчитывается от форштевня до точки отрыва расходящейся волны от корпуса, а также от точки снижения уровня в кормовой оконечности до ахтерштевня.

Интеграл (16) задает простое сложение волн в оконечностях корпуса, в отличие от исходного интеграла (15), который определяет процесс излучения и интерференции корабельных волн. Экспонента под интегралом является функцией частоты формы ($A(\vartheta)=A^*(k)$), и по мере роста высоты волны должны увеличиваться её длина и объем.

Группировка волн в разрушающиеся гребни

Мгновенная амплитуда в точке вершины волны не может превышать величины $A < 1,134/k$, а высота волны удовлетворяет ограничению:

$$h \leq 0,75 / k \quad \text{или} \quad h \leq \lambda / 8,38 \leq 1. \quad (17)$$

Если крутизна волны превышает эти ограничения, происходит разрушение гребня 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 (14): $V \cdot \cos \vartheta \leq V_0 q$.

1. Если условие (14) выполнено и расчеты ведутся по формуле (15), то необходимо искусственно ограничивать амплитуду волнообразования:

$$A(\vartheta, x) = \int A(\vartheta, x, z) \cdot e^{-kz} dz, \quad (18)$$

каким-то из искусственных способов добиваясь, чтобы амплитуда была не выше чем: $A(\vartheta, x) \leq 1/k$. Таким образом, из расчетов будет исключаться энергия разрушающихся гребней, которая в случае безусловного ис-

пользования линейной теории волн может необоснованно накапливаться. При построении картины волнообразования такие эффекты проявляются большими амплитудами волн и их завышенной крутизной.

2. Если же условие (14) не выполнено, то это означает, что волна не может оторваться от корпуса (Рис. 25). 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 $\bar{\omega}(\vartheta)$.

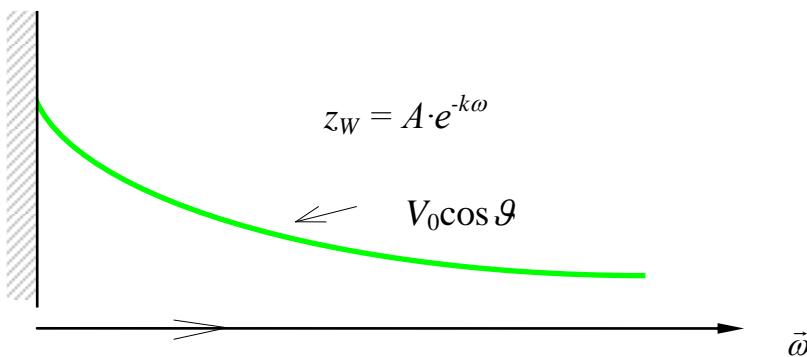


Рис. 25. Формирование волнового гребня в районе форштевня.

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 (20); 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:

$$A' = \frac{1}{k'} ; \quad k' \geq V_0^2 \frac{q}{g}. \quad (19)$$

В результате: $k' = \max\left(V_0^2 \frac{q}{g}, \sqrt{\frac{1}{S_0}}\right)$, или: $k' = \max\left(V_0^2 \frac{q}{g}, \sqrt{\frac{k_0}{A_0}}\right)$,

При уменьшении длины и скорости излучения перестанет выполняться условие отхода волны от корпуса (14) $\cos^2 \vartheta < |q|$, тогда высота волны ограничивается максимумом для стоячих трохоидальных волн.

Выражение (19) учитывает процесс стекания жидкости с гребня присоединенной к корпусу волны, которое также наблюдается в эксперименте. В результате происходит уменьшение частоты формы волны – увеличение её длины в точке отрыва от корпуса.

Для судна с полными обводами нарушение условия (19): $k' \geq V_0^2 \frac{q}{g}$

приводит к нарушению стационарности картины волнобразования, что обычно наблюдается в опытных экспериментах и объясняется возбуждением колебаний в направлении аппликаты z .

Численные решения используются для восстановления картины корабельного волнобразования с возможностью компенсации высоты волны по оценкам влияния локальных фрагментов судовых обводов, что может служить инструментом проектирования формы корпуса по условиям минимума излучения/отражения корабельных/штормовых волн.

Математическая оптимизация подводных обводов и надводной формы корпуса корабля, по сути, является поиском технических решений, обеспечивающих прохождение штормовой волны через корпус с минимальными искажениями. Заметим также, что подобные математические модели оценивают отражение от корпуса корабля акустических или радиолокационных волн.

1.2. Численная реализация расчетов волнового сопротивления и проектная оценка особенностей судовых обводов

Для динамического контроля результатов вычислений и применения эмпирических зависимостей в реализации решений по интегралу Мичелла (5', 10), заменим аргумент в виде фазового угла Кельвина ϑ на длину излучаемой корпусом корабельной волны λ :

$$d\vartheta = \frac{d\lambda}{2\lambda \cdot \sqrt{\Lambda - \lambda}} \text{ – выражение для дифференциала;}$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = 2\pi \frac{V_0^2 \cos^2 \vartheta}{g} \text{ – фазовая длина волны;}$$

$$\Lambda = 2\pi V_0^2 / g \text{ – критическая/максимальная длина поперечной волны;}$$

$$M = \frac{V_0}{C} = \sqrt{\frac{\Lambda}{\lambda}} = \frac{1}{\cos \vartheta} \text{ – аналог волнового числа Маха;}$$

$$C = V_0 / M \text{ – фазовая скорость волны;}$$

$H=A \cdot \lambda \cdot M/4$ – функция Коцина.

Расчетные формулы примут вид:

$$\begin{aligned}\omega_0 &= \frac{x_0}{M} + \frac{y_0 \sqrt{M^2 - 1}}{M}; \\ A(\lambda) &= \frac{M}{\lambda} \cdot \left| \int_{\Omega} q \cdot e^{k \cdot (-z_0 + i\omega_0)} d\Omega_0 \right|; \\ R_X &= \frac{\rho \cdot g}{4} \int_0^L A^2(\lambda) \frac{d\lambda}{\lambda \cdot M \sqrt{M^2 - 1}}.\end{aligned}$$

Функция $A(\lambda)$ осциллирует и имеет особенность порядка $\lambda^{-3/2}$ при $\lambda \rightarrow 0$. Интеграл волнового сопротивления имеет особенности на границах порядка $\lambda^{1/2}$ при $\lambda \rightarrow 0$ и $\lambda \rightarrow \Lambda$. Уточнение расчетов востребует использование условий, учитывающих особенности волнообразования вблизи поверхности корпуса.

Интеграл по ватерлиниям

$$A(\lambda, z) = \int_{-L/2}^{L/2} q(x, z) \cdot \exp\left(\frac{i \cdot k}{M} (x + y \sqrt{M^2 - 1})\right) dx.$$

При малых λ интеграл осциллирует, при λ соизмеримой с длиной корпуса интеграл вычисляется методом трапеций. Для оценки осцилляции введем параметр Np – количество расчетных узлов на длину волны λ . Критерием допустимости интегрирования является условие:

$$\frac{L}{Ni - 1} \cdot Np \geq \frac{2\pi}{k} \frac{M}{\lambda} = \sqrt{\Lambda \cdot \lambda},$$

где L – длина между перпендикулярами; Ni – количество шпангоутов; Np – допустимое количество точек аппроксимации, приходящихся на один период рассчитываемой корабельной волны.

В случае, если это условие не выполняется, то используются линейные аппроксимации подынтегральных функций с аналитическим интегрированием каждой шпации в отдельности.

$$\begin{aligned}A(\lambda, z, \Delta x) &= \int_{x_i}^{x_{i+1}} (a + bx) \exp(i(\alpha + \beta - x)) dx, \\ a &= \frac{q(x_i) + q(x_{i+1})}{2}, \quad b = \frac{q(x_{i+1}) - q(x_i)}{\Delta x}, \\ \alpha &= \left(\frac{x_i + x_{i+1}}{2} + \frac{y_i + y_{i+1}}{2} \cdot \sqrt{M^2 - 1} \right) \frac{k}{M},\end{aligned}$$

$$\beta = \left(1 + \frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta x} \cdot \sqrt{M^2 - 1} \right) \cdot \frac{k}{M}.$$

$$A(\lambda, z, \Delta x) = \frac{\exp(i(\alpha + \beta - x))}{\beta} \left(ia - ibx + \frac{b}{\beta} \right)_{x_i}^{x_{i+1}} = \Phi(x_{i+1}) - \Phi(x_i)$$

Абсолютное значение интеграла $A(\lambda, z)$ всегда меньше, чем максимальное значение по абсолютной величине от подынтегральной функции, равное максимуму от $q(x, z)\sqrt{1+y_x'^2+y_z'^2}$, достигаемому вблизи штевней. Если заранее рассчитать такие максимумы, то критерием достижения заданной точности при вычислении интеграла по ватерлиниям явится выражение $e^{-kz} \cdot |\max(q \cdot \Omega)| > \text{eps}$, где eps – принятая в расчетах абсолютная точность. Иначе $A(\lambda, z) = 0$, если $e^{-kz} \cdot |\max(q \cdot \Omega)| > \text{eps}$.

Интегрирование результатов расчета по ватерлиниям

$$A(\lambda) = \int_0^T A(\lambda, z) \cdot e^{-kz} dz$$

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 может быть перенесен на $A(\lambda, z)$. Знак абсолютной величины ослабит, но не исключит возможность осцилляции функции $A(\lambda, z)$, поэтому выбран метод вычислений, суть которого можно определить как двойную аналитическую аппроксимацию $A(\lambda, z)$ в точках вблизи действующей ватерлинии (*где: $z \rightarrow 0$*).

Аппроксимируя $|A(\lambda, z)| = f(z)$ с помощью параболы:

$$\int_0^Z f(z) e^{-kz} dz = \int_0^Z (a + bx + cx^2) \cdot e^{\beta z} dz = I(z),$$

$$\beta = -k; \quad a = f(0); \quad b = \frac{-3f(0) + 4f'(z_1) - f''(z_2)}{2 \cdot \delta z};$$

$$c = \frac{f(0) - 2f'(z_1) + f''(z_2)}{2 \cdot \delta z}, \text{ где: } f' = f e^{-bx}; \quad f'' = f e^{-bx^2}.$$

Ось Z полагается разбитой на равные интервалы: Δz – расстояние между ватерлиниями; $Z_1 = \Delta z$; $Z_2 = 2\Delta z$, то:

$$I(z_2) = I(z_1, z_2) = e^{\beta - x} \cdot \left(\frac{a + bx + cx^2}{\beta} - \frac{b + 2x}{\beta^2} + 2 \frac{c}{\beta^3} \right) \Big|_0^{Z_2};$$

$$I(z_1') = I(z_1', z_2') = I(2 \cdot z_1, 2 \cdot z_2); \quad I(2\Delta z) = \frac{I(z_2) + I(z_1')}{2}$$

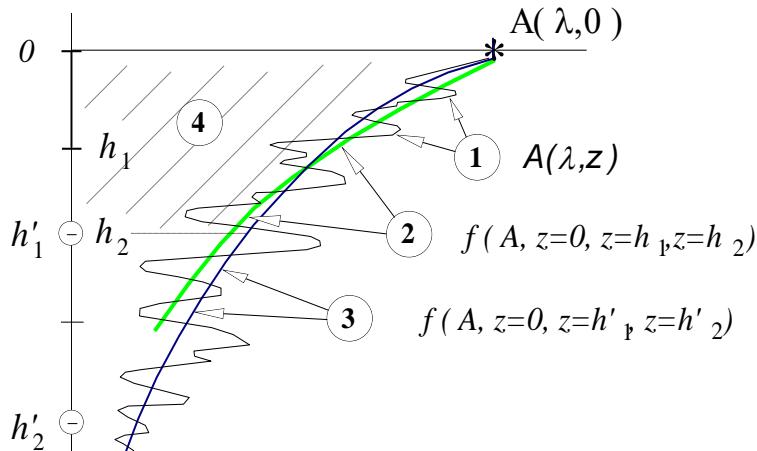


Рис. 26. Геометрическое представление функции $A(\lambda, z)$ и ее аналитических аппроксимаций.

Показанная аналитическая аппроксимация применяется только в том случае, если значения функции $|A(\lambda, z)|$ в точках $z=0$ и $z=\delta z$ отличаются на порядок. Иначе ведется интегрирование по методу Симпсона.

Если же $A(\lambda, 0)/A(\lambda, z_1) > 12$, то используется расчет поправки вида: $\delta A(\lambda, z) = I(2\delta z) - |A(\lambda, 2\delta z)|\delta z/2$.

После этого последние две точки в массиве $A(\lambda, z_i)$ обнуляются, и дальнейшее интегрирование ведется по методу трапеций.

Интеграл по волновому спектру, расчет сопротивления

$$R_X = \frac{\rho g}{4} \int_0^\Lambda \frac{A^2(\lambda) \cdot M}{\lambda^2 \sqrt{M^2 - 1}} d\lambda = \frac{\rho V_0}{4} \sqrt{2\pi g} \int_0^\Lambda \frac{A^2(\lambda)}{\lambda^2 \sqrt{\Lambda - \lambda}} d\lambda$$

Здесь A имеет размерность $[m^2]$ и обладает экспоненциальным стремлением к нулю при $\lambda \rightarrow 0$. Сам же интеграл имеет особенности в точках $\lambda \rightarrow \Lambda$ типа $\lambda^{1/2}$; $\lambda \rightarrow 0$ типа λ^{-2} , которая гасится экспонентой в выражении $\frac{A^2(\lambda)}{\lambda^2 \sqrt{\Lambda - \lambda}} = f(\lambda)$.

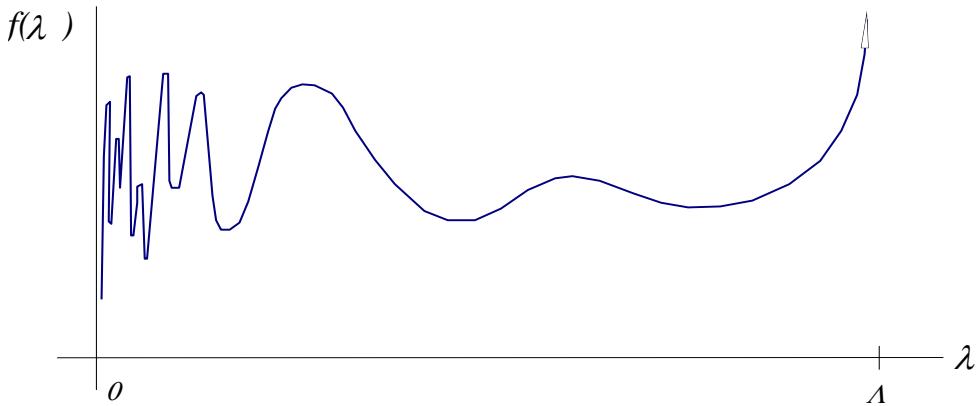


Рис. 27. Характер поведения подынтегральной функции:

При вычислении интеграла по волновому спектру необходимо постоянно оценивать степень осцилляции функции $f(\lambda)$. Разбивая этот интеграл на две части:

1) $[\lambda_i : \Lambda]$ - слабо осциллирующую, но обладающую особенностью типа $\lambda^{-1/2}$ при $\lambda \rightarrow \Lambda$;

2) $[0 : \lambda_i]$ - сильно осциллирующая часть интеграла, включающая 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:

$$\exp\left(\frac{i \cdot k}{M} L\right) = f(\lambda) = \exp\left(\frac{i \cdot 2\pi \cdot L}{\sqrt{\lambda \Lambda}}\right),$$

где: L - длина судна.

Если допустить “проход” трех периодов волн в полученной зависимости от аргумента λ , тогда:

$$\lambda_i = \frac{(L/\Lambda)^2}{(L/\Lambda + 3)^2} \cdot \Lambda, \text{ а отношение } \Lambda/L = 2\pi \cdot F_N^2.$$

При вычислении интеграла $\int_{\lambda_i}^{\Lambda} f(\lambda) d\lambda$ используется рекурсивный алгоритм, основанный на использовании полиномов Гаусса 4-й степени для аппроксимации функции с особенностями на границах интервала интегрирования.

Для участка подынтегральной функции без осциллирующих особенностей $\int_0^{\lambda_i} f(\lambda) d\lambda$ достаточно традиционного метода трапеций.

1.3. Аналитическое описание судовых обводов, проектный анализ и оптимизация элементов формы корпуса

Проведение вычислительного анализа формы корпуса предваряло подготовку к испытаниям модели в опытном 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 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.

Целью систематических расчетов волнового сопротивления становится 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: $Fn = 0,4$.

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 длительно-

стью вычисления элементарных функций или из-за необходимости унификации описания реальных и модельных корпусов судов.

При проведении численного моделирования волнового сопротивления данные о форме корпуса хранятся в прямоугольных массивах (Рис. 28), с помощью которых производится интерполяционное описание отдельных ватерлиний.

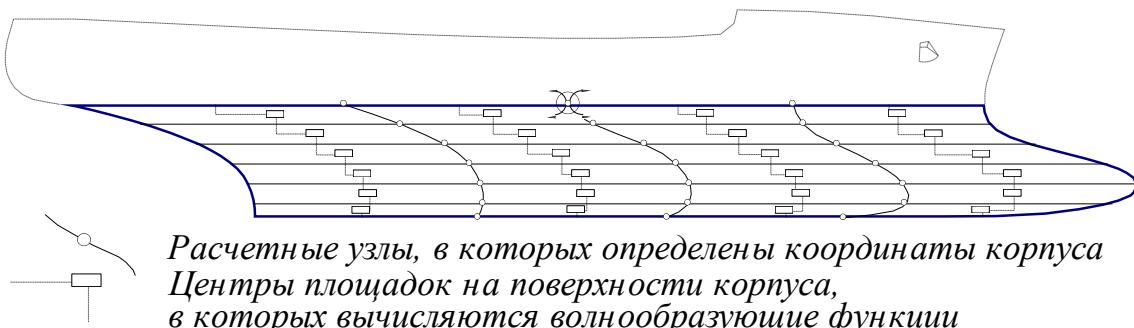


Рис. 28. Дискретное разбиение подводной части судовой обшивки для построения численной модели формы корпуса.

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 (*штаций*) по x (длине корпуса);

K – количество интервалов по z (слои между ватерлиниями).

На практике расчеты с использованием сеточного предопределения всех параметров формы корпуса выполняются значительно быстрее, чем при чисто аналитическом построении, что важно как при вычислении ординат корпуса, так и всех их производных. Для практического описания реального корпуса, при проведении оптимизационной серии вычислительных экспериментов этот метод становится единственным.

“Парabolicкие” (степенные) обводы

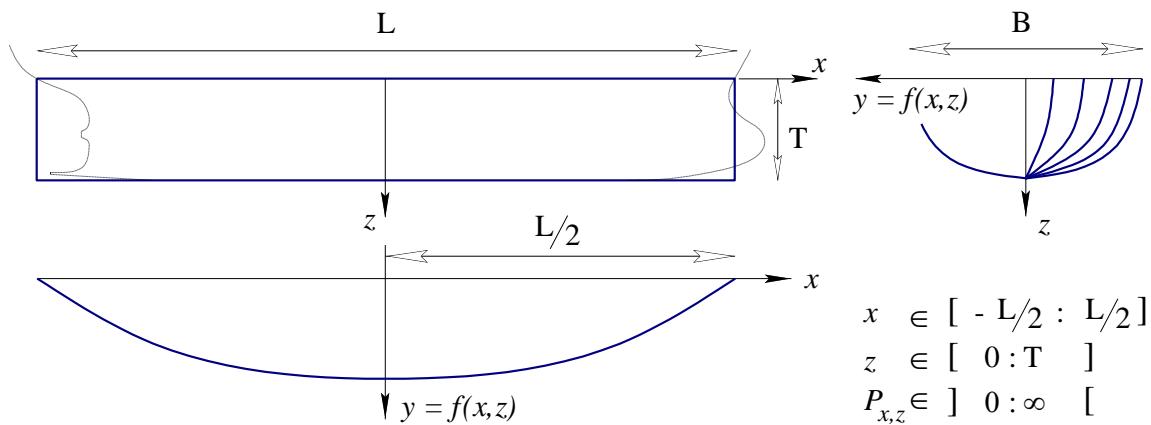


Рис. 29. Область определения аналитических функций для моделирования параболических обводов формы корпуса.

Построение аналитических обводов корпуса (Рис. 29) 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: $\delta = \alpha/\beta$.

В оценочных расчетах волнового сопротивления приняты размерения корпуса: длина – $L=90$; ширина – $B=16$; осадка – $T=8$.

Таблица 1.

Характеристики моделей корпуса с парabolicкими обводами (КПО)

N	M	α	δ	S [m^2]	D [m^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 [m^2]	D [m^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

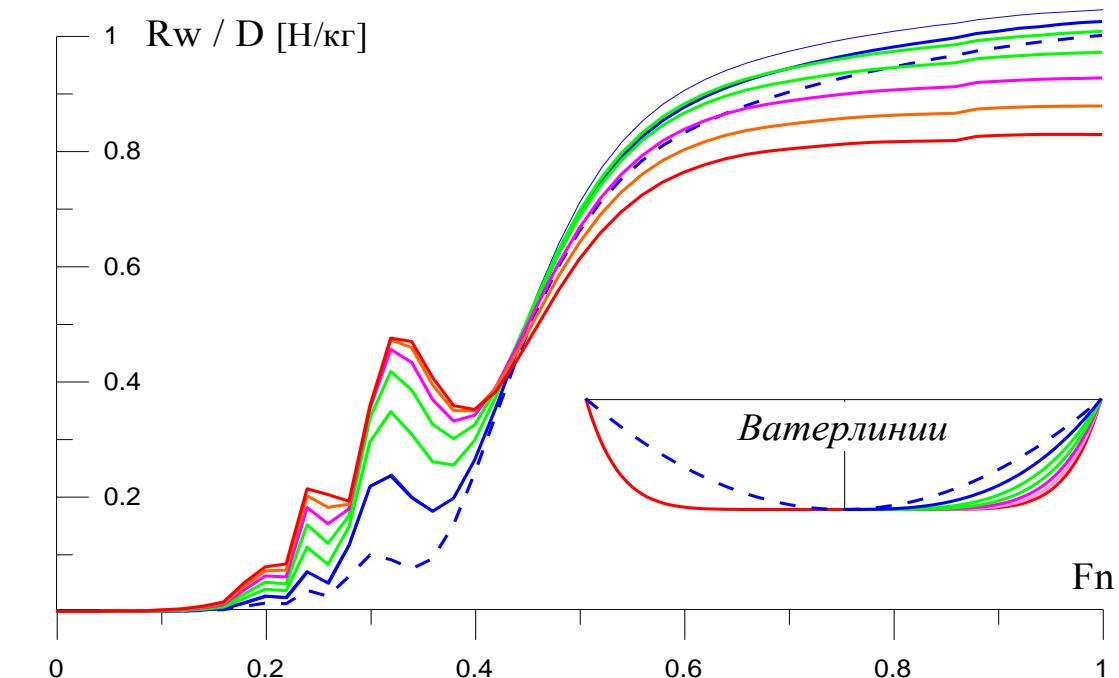


Рис. 30. Расчетные кривые удельного волнового сопротивления, отнесенного к водоизмещению, для симметричного относительно мидельшпангоута парabolicкого корпуса

Из анализа графиков удельного волнового сопротивления (Рис. 30) следуют предварительные заключения о построении оптимальной формы корпуса корабля:

1. Увеличение полноты ватерлиний существенно сказывается на удельном сопротивлении при скоростях хода $F_n = 0,4$ и менее;
2. Полнота ватерлиний и шпангоутов мало влияет на величину удельного сопротивления при $F_n \geq 0,5$, однако при существенном увеличении полноты корпуса удельное сопротивление уменьшается;
3. Увеличение полноты мидель-шпангоута приводит к уменьшению удельного сопротивления при скорости $F_n = 0,5$ и практически не влияет на сопротивление при $F_n = 0,3$;
4. 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.

$$f_1(x) = \frac{1}{2}(1 + \cos \pi x),$$

$$f_2(x) = \frac{P}{P+2} \left((P \cdot (1-x))^{-z-1} + (P \cdot (1+x))^{z-1} + 1 \right)$$

Произведение $f_1 \times f_2$ 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 | $P \leq 0.5.$ |

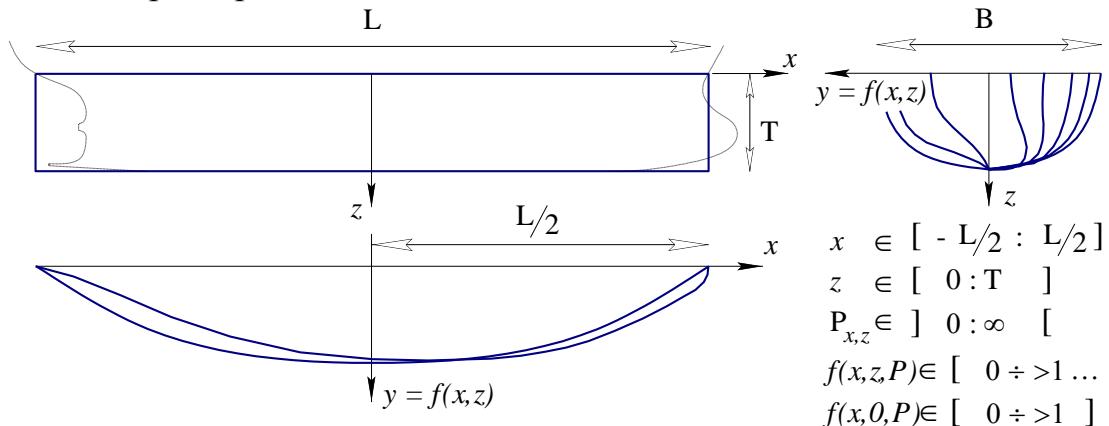


Рис. 31. Система координат и линии чертежа асимметричного корпуса

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 контрастно представить особенности формы аналитического корпуса.

Для контура мидель-шпангоута введена степенная гипербола:

$$B(z) = (1-z) \frac{2(P+2)}{P} = (1-z)^{\left(2+\frac{4}{P}\right)},$$

обеспечивает форму подводного крыла при малых P , и уменьшает полноту мидельшпангоута при увеличении параметра P .

Область определения:

Можно определить параметры полноты раздельно для кормовой и носовой частей корпуса Pa и Ps :

$$f(x, z) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{Pa} + \frac{1}{Ps} + 1 \right)^{-1} \cdot (1 - z)^{\left(2 + \frac{8}{Pa+Ps} \right)} \times \\ \times (1 + \cos \pi x) \left((Ps(1 - x))^{-z-1} + (Pa(1 + x))^{z-1} + 1 \right).$$

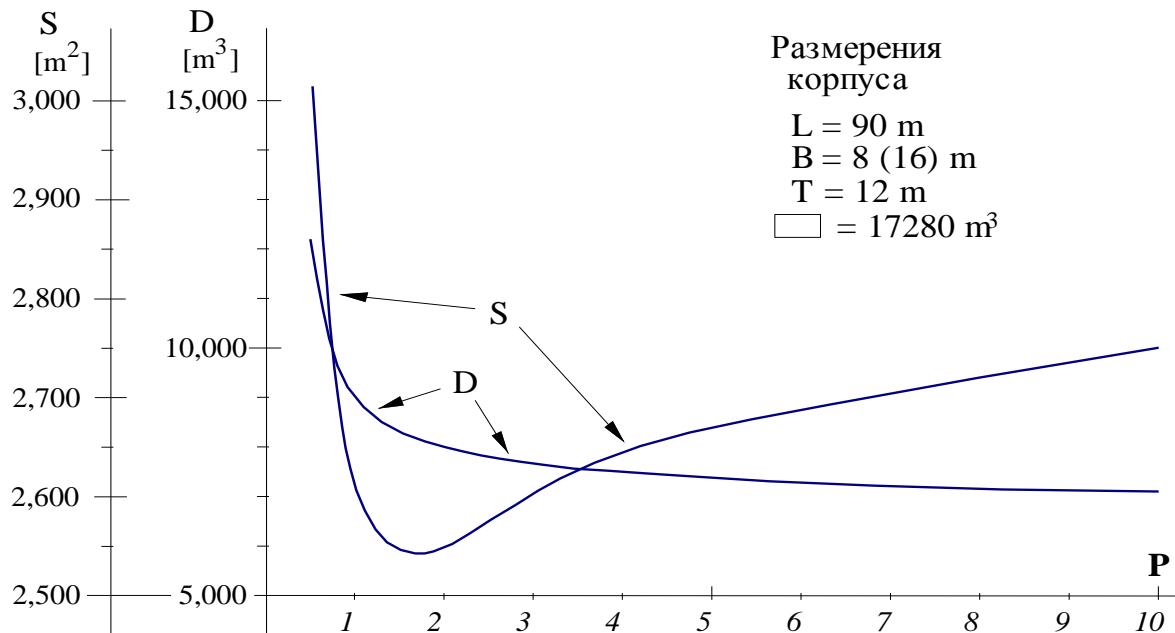


Рис. 32. Кривые водоизмещения (D) и смоченной поверхности (S) в зависимости от параметра P ассиметричной модели корпуса гипотетического судна. L - длина, B - ширина, T - осадка и \square - объем размерного параллелепипеда.

При этом:

1. Увеличение P приводит к заострению ватерлиний в оконечностях и уменьшению размеров бульба, одновременно уменьшается коэффициент общей полноты. При $P \rightarrow \infty$, 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 $P \geq 1.5$ ($Ch(1.0)=1.54308$).

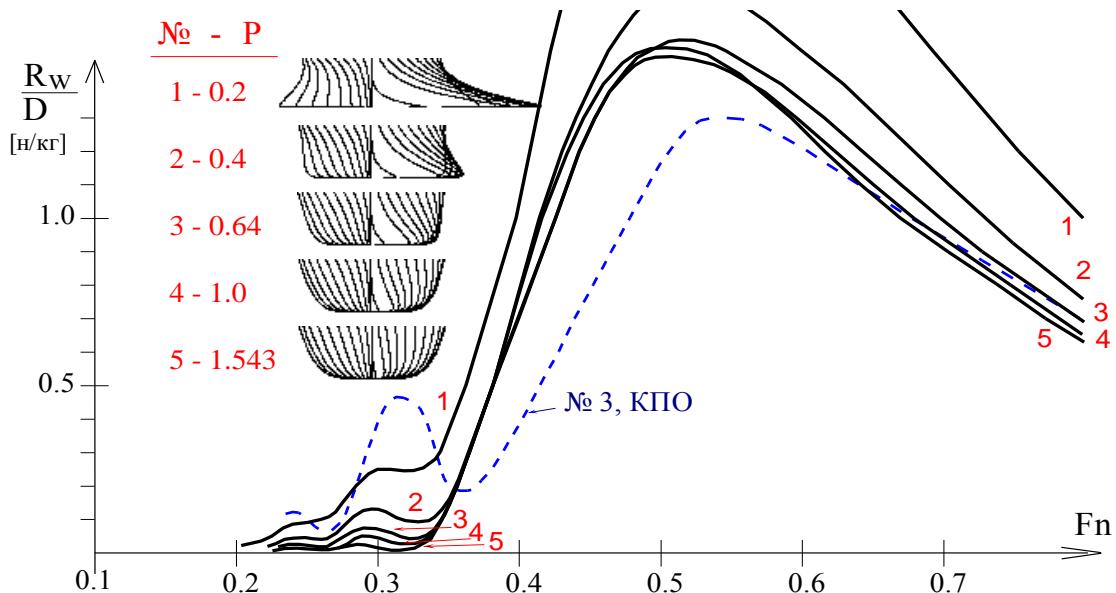


Рис. 33. Расчетные кривые удельного волнового сопротивления для несимметричного относительно мидель-шпангоута корпуса с экспоненциально-тригонометрическими обводами. Синим пунктиром показан расчет для корпуса с параболическими обводами, отмеченной под № 3 в предыдущей серии расчетов.

Из анализа графиков удельного волнового сопротивления (*отношения волнового сопротивления к водоизмещению*, **рис.33**) следуют выводы:

1. Применение носового бульба существенно снижает удельное волновое сопротивление на скорости хода, соответствующей минимуму на $F_n = 0.3$. При этом большая полнота действующей ватерлинии не приводит к значительному увеличению сопротивления, которое наблюдалось у корпусов с симметричными параболическими обводами;
2. Если параметр $P \geq 1.5$, то сопротивление на скорости $F_n = 0.3$ 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 $F_n = 0.3$. Но при этом

оно сравнимо с сопротивлением корпусов с параболическими обводами;

4. Корпус с экспоненциально тригонометрическими обводами (КЭТО) показал худшую ходкость на скорости, соответствующей $F_n=0.5$, по сравнению с корпусами симметричными относительно мидельшпангоута (КПО);
5. Можно также отметить, что носовой бульб уменьшает относительную разность между экстремумом удельного сопротивления на $F_n = 0.3$ и минимумом сопротивления на $F_n \approx 0.35$.

За оптимальный обводы получаются при параметре $P = 1,0$, что соответствует минимуму удельного волнового сопротивления на скорости хода $F_n = 0,5$. 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: $z = z/T$,² k - коэффициент сужения (деформации) ширины действующей ватерлинии. Если необходимо сохранить коэффициент общей полноты, то при использовании данной формулы необходимо проводить дополнительную корректировку общей ширины корпуса.

Наклон борта в средней части корпуса (Рис. 34) слабо влияет на удельное сопротивление на малых и средних скоростях хода, до $F_n \leq 0.4$. Расчеты также показывают, что обводы с вертикальными бортами дают максимальное волновое сопротивление на больших скоростях при $F_n > 0.4$, когда длина излучаемой корабельной волны становится больше

² Замечание: $z=z/T$ - означает, что величина z нормирована до единицы.

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 опытном бассейне, которые редко проводятся на скоростях хода более чем $F_n > 0.5$, 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.

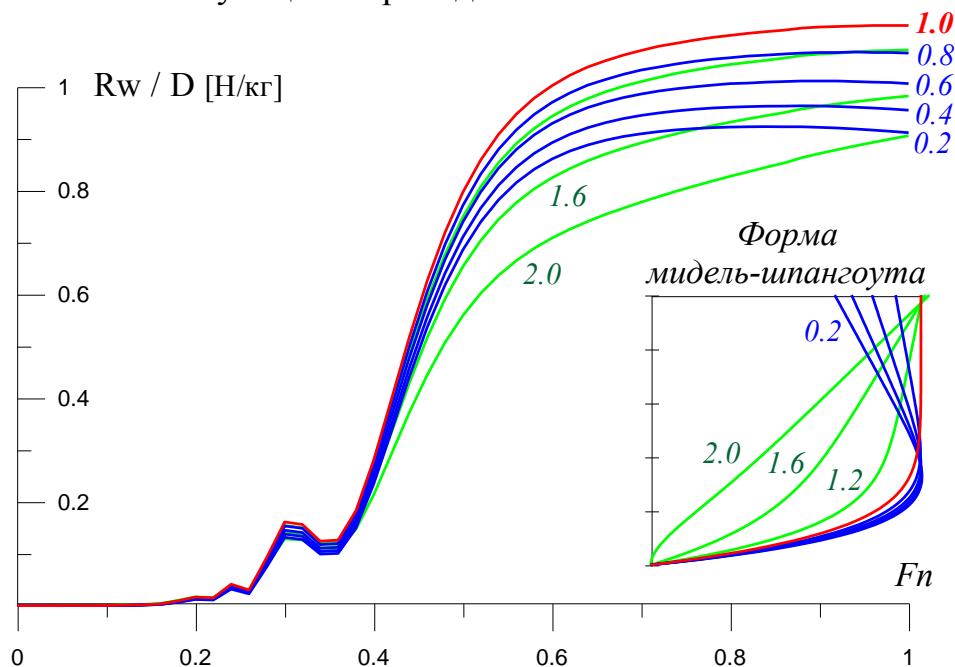


Рис. 34. Расчетные кривые удельного волнового сопротивления при изменении наклона бортов на уровне действующей ватерлинии в средней части корпуса.

На Рис. 34 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:

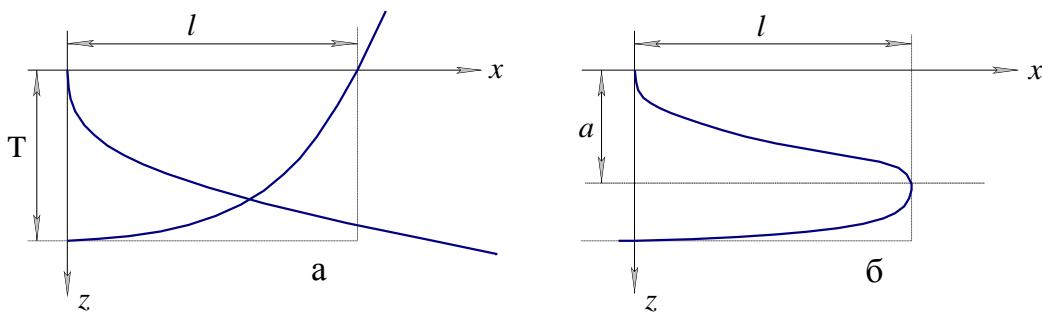


Рис. 35. Функции, образующие форштевень (a), и их произведение (b).

Форштевень образуется произведением двух функций:

$$x = \frac{L}{2} + L \cdot \left(\frac{z}{T} \right)^m \cdot \left(1 - \frac{z}{T} \right)^{\frac{1}{n}}; \quad n = \frac{\ln(T-a) + \left(\frac{1}{a} - 1 \right) \cdot \ln a}{\ln l}; \quad m = \frac{T-a}{na}.$$

где: $l \in]0 \div 1[$ - относительная длина бульба;

$a \in]1/2 \div 1[$ - относительное погружение бульба.

Ахтерштевень

Область определения:

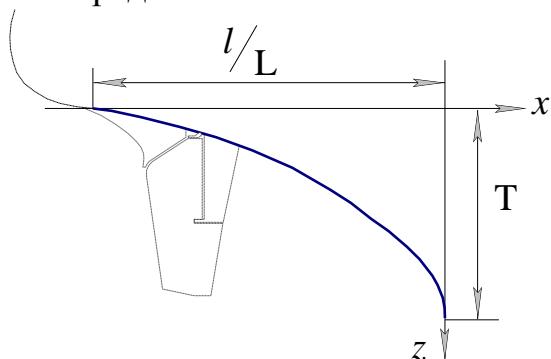


Рис. 36. Определение изгиба кормового подзора с помощью эллипса.

$$\text{Ахтерштевень описывается эллипсом: } x = -\frac{L}{2} + L \cdot l \cdot \sqrt{1 - \left(1 - \frac{z}{T}\right)^2},$$

где: l – относительная длина кормового подзора.

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.

Окончательный вид линии контура ахтерштевня и кормовые ветви ватерлиний должны согласовываться локально, при этом характер линий тока должен подстраиваться под особенности работы винто-рулевого 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

Теоретические чертежи, приведенные в данной главе, были получены для проведения оценочных вычислительных экспериментов с сериями различных судов, где аналитическое описание формы корпуса га-

рантировало плавное изменение заданных характеристик судовых обводов. Иллюстрации построены по растровому изображению.

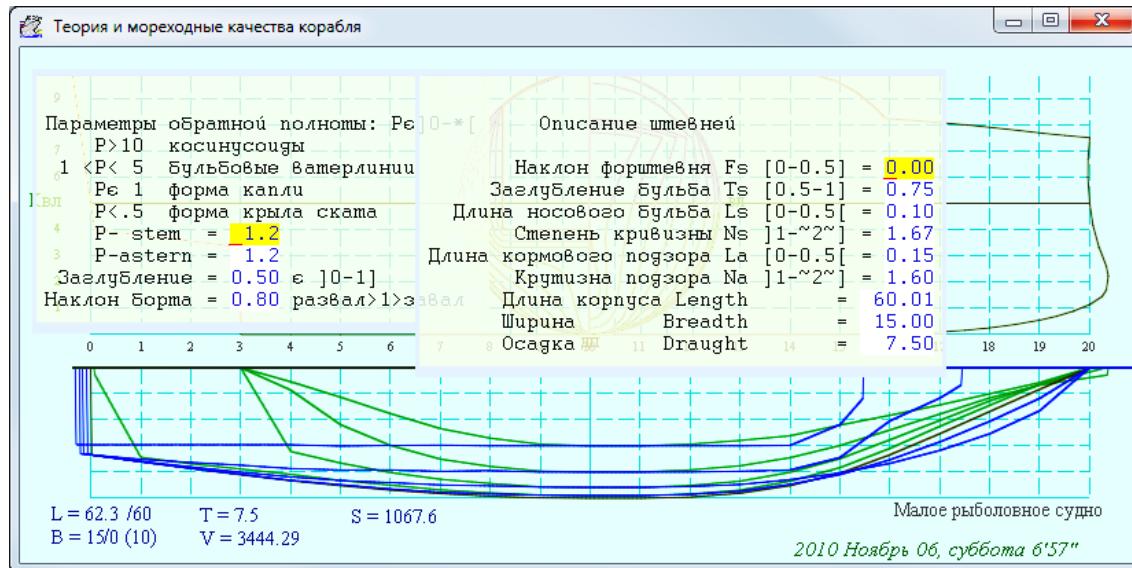


Рис. 37. Программный комплекс Hull, включающий работу с таблицами плавовых ординат и построение аналитических обводов; расчеты остойчивости и гидростатических кривых; волнового сопротивления и интенсивности излучения корабельных волн вдоль корпуса корабля. РОСПАТЕНТ: № 2010615849, опубликован на www.ShipDesign.ru/SoftWare.

В качестве главных недостатков “параболического” и “асимметричного” корпусов можно отметить упрощенное описание скуловых обводов, где с помощью специальных изгибов корпуса должно происходить гашение энергии расходящихся корабельных волн. Анализ расходящихся корабельных волн выходит за рамки теории «тонкого судна» Мичелла, а их формирование является сугубо трехмерным процессом, связанным с вихреобразованием на поверхности жидкости, где вихревые линии вытягиваются вдоль корпуса (*правильное построение формы скуловых шпангоутов могло бы уменьшить волнообразование в точке минимума ($F_n=0.4$) на кривой остаточного сопротивления*).

В расчетах использована аналитическая модель корпуса судна, что требовалось для сравнения результатов с сериями измерений волнового сопротивления в опытном бассейне. Учитывая, что опытная модель корабля имела несколько экстраординарные обводы, было принято решение о совместных опытных экспериментах со стандартными моделями судов, имеющими традиционные обводы.

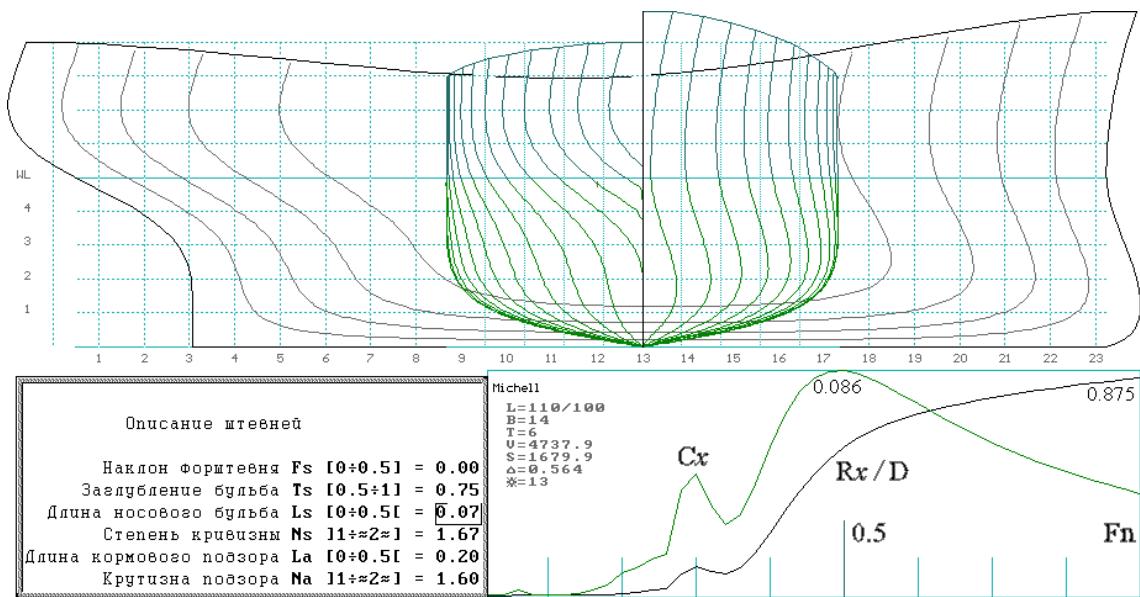


Рис. 38. Корпус, построенный из “параболических” функций. В табличке приведены параметры, определяющие форму штевней. На графике справа приведены расчетные кривые коэффициента Cx и удельного Rx/D волновых сопротивлений. Слева внизу показаны: Ns - задает плавную стыковку бульбового профиля с основной линией; Na - определяет угол пересечения ахтерштевня с ватерлинией.

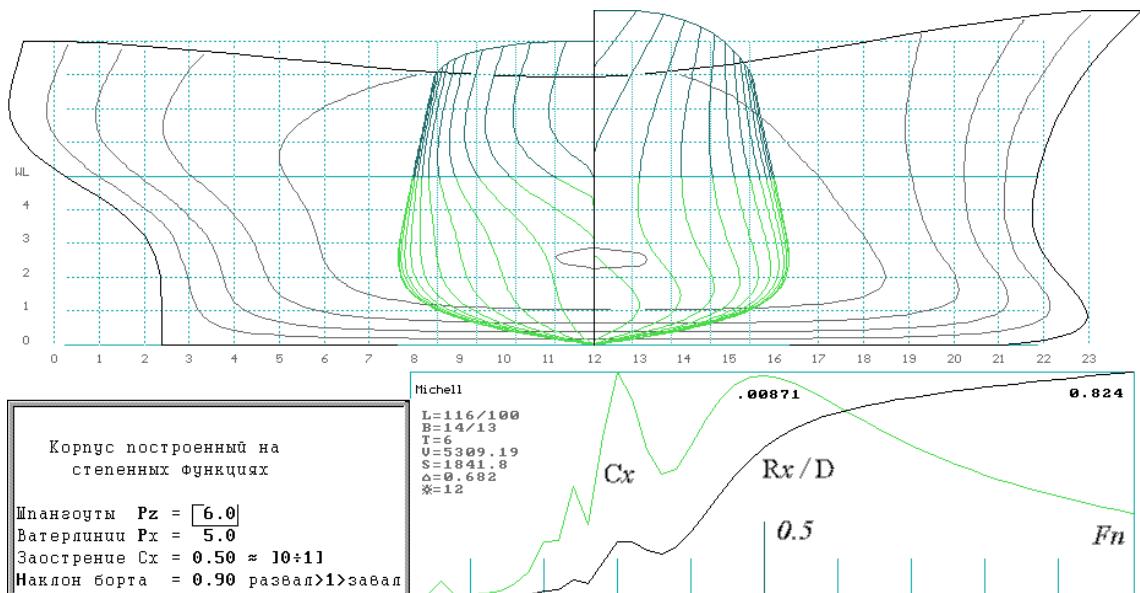


Рис. 39. Тот же корпус, но с увеличенной полнотой ватерлиний, наклонным форштевнем и завалом бортов. Приведены расчетные кривые коэффициента и удельного волнового сопротивления. Увеличение полноты ватерлиний приводит к существенному увеличению волнового сопротивления на малых скоростях хода, с появлением 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 опытном 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 ($F_n=0.3$) одновременно наблюдается рост сопротивления за счет сглаживания минимума на скорости, соответствующей ($F_n=0.4$).

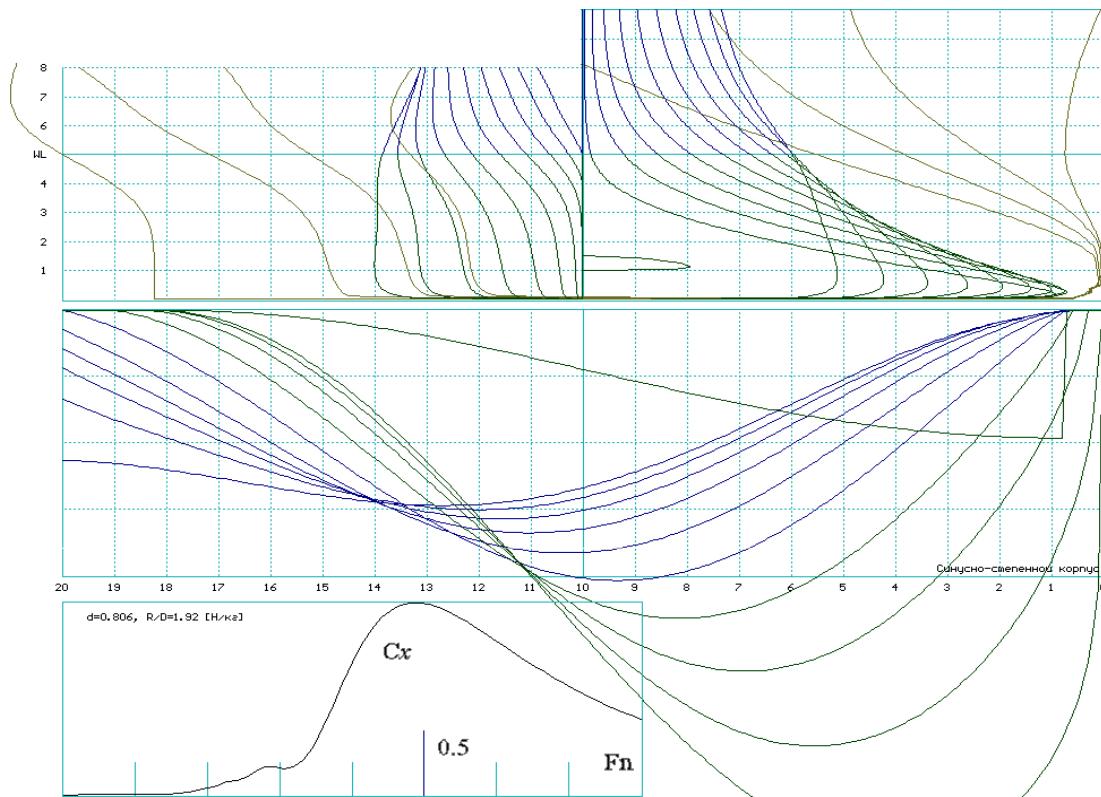


Рис. 40. Крайняя форма аналитического представления бульбовых обводов, когда бульб становится похожим на «крыло ската».

Для решения задачи об оптимизации формы корпуса на этих промежуточных скоростях необходимо как уточнение расчетов по формулам Мичелла, путем полумпирического учета нелинейных эффектов

венообразования, 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 венообразования 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* $F_n \geq 0.5$), 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 $F_n \geq 0.2$.

Проектные заключения по судовым обводам на основе результатов вычислительных экспериментов

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 венообразовании.

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 $F_n \approx 0,3$, являющегося барьером ходкости для быстроходных транспортных судов. Подтверждается снижение экстремума на кривой волнового сопротивления на скорости порядка $F_n \approx 0,2$, достигаемое применением бульбовых обводов в окончностях 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 $F_n \approx 0,24$ и $F_n \approx 0,4$.

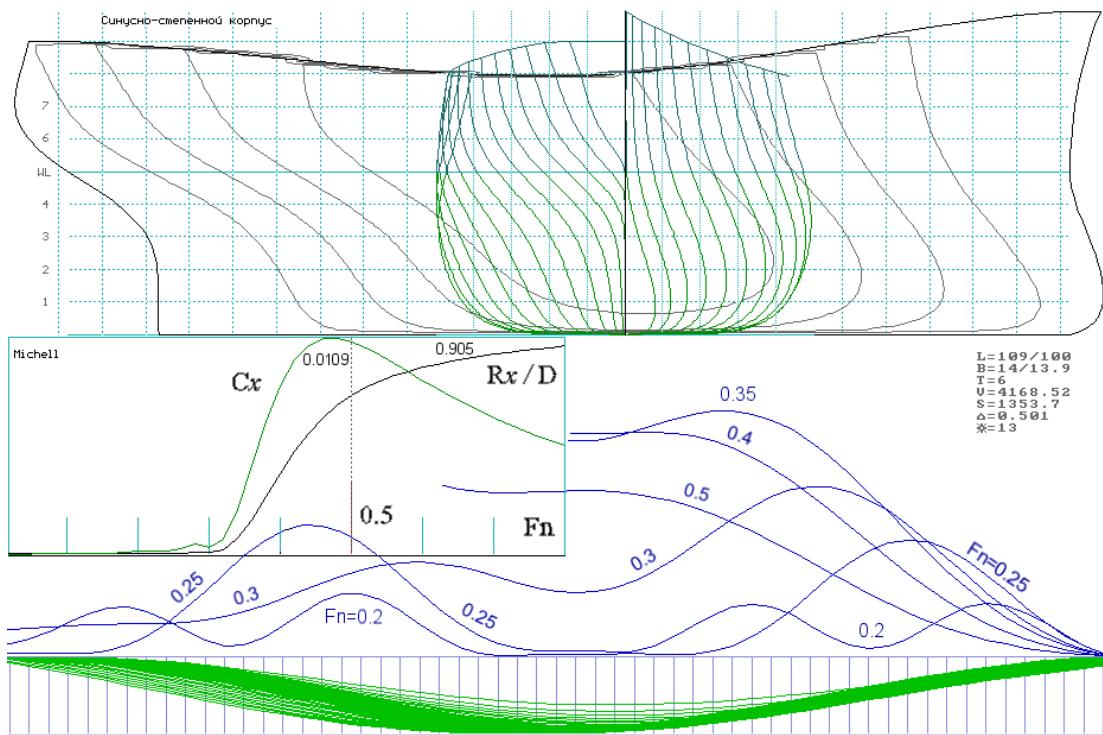


Рис. 41. Асимметричный относительно мидель-шпангоута корпус позволяет минимизировать волновое сопротивление на скоростях хода до чисел Фруда порядка $F_n=0.3$, чему способствует смещенная в нос полнота подводной части корпуса. Аналогичный выигрыш на средних скоростях хода дают обводы корпуса в виде «двойного клина». При этом, несмотря на очень вогнутые и острые ватерлинии, удельное сопротивление на $F_n=0.5$ не уменьшилось, а также минимум на $F_n=0.4$. Синими линиями показано распределение интенсивности зарождающейся вдоль корпуса волновой энергии. Числа рядом с этими кривыми отмечают соответствующую скорость хода.

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. Поэтому 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 излу-

чения 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 опытном бассейне и в свободном плавании самоходной модели различными курсами относительно интенсивного волнения. На экспериментальном этапе должны отрабатываться сколовые обводы корпуса, отвечающие за минимизацию кильевой 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 отсут-

ствие 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 корпуса³ судна.

³ Решение всех перечисленных задач пока не поддерживается правилами Морского регистра России

Глава 2. Предназначение судна – всесезонная навигация в сложных, штормовых и ледовых условиях

Важно обратить внимание на динамику 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 гребни волн не наносят ударов по корпусу малоподвижного корабля, но они способны подбрасывать его вверх, или опускать под удары крупные волновые гребни. Теоретически, если на вершинах волн образуются обрушающиеся гребни, то «подбрасывания» и «опускания» оконченностей 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, имеющим протяженность порядка 2-3 волн с характерными для групповой структуры периодами. В этот момент судоводитель имеет возможность встать на обратный курс, или вырваться из жесткого объятья штормовых волн, если судно, потеряв управляемость, будет поставлено штурмом лагом к волне.

Знание 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 большей степени должна обеспечиваться мореходными качествами формы корпуса корабля, особенностями его обводов и архитектурным обликом, не ведущем к жестким контактам с сокрушительными волнами и ураганными ветрами. Такие инженерные решения должны отрабатываться

ваться в вычислительных и опытных экспериментах на самых ранних стадиях проектирования нового корабля.

Математические модели штормовых волн и гидромеханика их силового взаимодействия

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.



Рис. 42. Характерная форма штормовой прогрессивной волны. Угол склона вблизи вершины достигает 30° . При длине волны $\lambda = 100$ м (период 8 сек.), суммарная высота от впадины до вершины составляет 12 м (прилив/отлив – +9 / -3 м), а скорость набегающего потока в гребне превышает 20 узлов

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:

$$\begin{aligned}x_w(a, x, z) &= x - a \cdot \sin(x \cdot 2\pi / \lambda) \cdot e^{2\pi \cdot (z + a \cdot \cos(x \cdot 2\pi / \lambda) - a) / \lambda}; \\z_w(a, x, z) &= z + a \cdot \cos(x \cdot 2\pi / \lambda) \cdot e^{2\pi \cdot (z + a \cdot \cos(x \cdot 2\pi / \lambda) - a) / \lambda},\end{aligned}\quad (1)$$

где: x_w , z_w – расчетные аппликата и абсцисса частиц жидкости, включившихся в волновое движение с 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: $0 < a \leq 1,0$; $z \leq 0$.

Прогрессивные волны Герстнера представляют серьезную опасность для неуправляемого судна без хода (Рис. 42), так как встречные

течения в вершинах и впадинах волн стремятся поставить его корпус лагом к волне, после чего возможен мощный силовой удар по надводному борту и последующее увлечение всего судна в интенсивный вихревой поток обрушающихся гребней штормовых волн.



Рис. 43. Испытание телевизионной модели 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 на мелководье 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. 43). «Девятые 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.

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

ровавшиеся «девятые» валы значительно теряют в скорости свободного движения. 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: $a' = a/1,286$.

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

где основные параметры трохоидальных волн эмпирически подобраны так, чтобы при $a = 1,0$ угол склона вблизи вершины прогрессивной волны (1) достигал 30° , а в случае групповой структуры волн (2) угол склона вблизи вершины «девятого вала» превышает 45° (*теоретически до 60°*). Встреча столь крутых гребней характерна для условий плавания вблизи центров штормовых циклонов, где кроме гидродинамических условий зарождения девятых валов происходит прямая суперпозиция встречных волн с крутизной вплоть до $1/4$, что существенно превышает оценки для прогрессивных волн с отношением высоты к длине порядка $1/7$. «Девятый» вал проявляется как стоячая волна, а движущиеся перед ним и вслед за ним крупные прогрессивные волны способны обрушиваться на судно мощными высокоскоростными потоками, с жесткими ударами по скулам корпуса, резкой качкой, и опасностью катастрофического подныривания носовой палубы под «девятый вал» с сильным носовым дифферентом и на высокой скорости хода, ускоренной в динамике скатывания с гребня в глубокую впадину между волнами.

Особенности штормового кораблевождения

Неоптимизированный для штормового плавания корабль может уклоняться от неблагоприятных сценариев кораблекрушения с помощью активного маневрирования, если у штурвала стоит опытный рулевой, и вахтенный штурман обладает достаточными знаниями хорошей морской практики.

Такой опыт штормового маневрирования, в том числе в процессе перспективного проектирования судов, мореплаватели могут применять и оценивать при непосредственном участии в испытаниях с самоходны-

ми моделями судов, с последующим синтезом результатов мореходных экспериментов на специальных прибрежных морских полигонах.

Современные цифровые регистраторы качки, акселерометры и радиолокационные построители волнового поля могут успешно применяться в бортовых системах автоматического штормового управления судном, как минимум обеспечивая экспертные предложения или информационно-аналитические рекомендации судоводителям о выборе курса и скорости для эффективного хода или безопасного штормования.

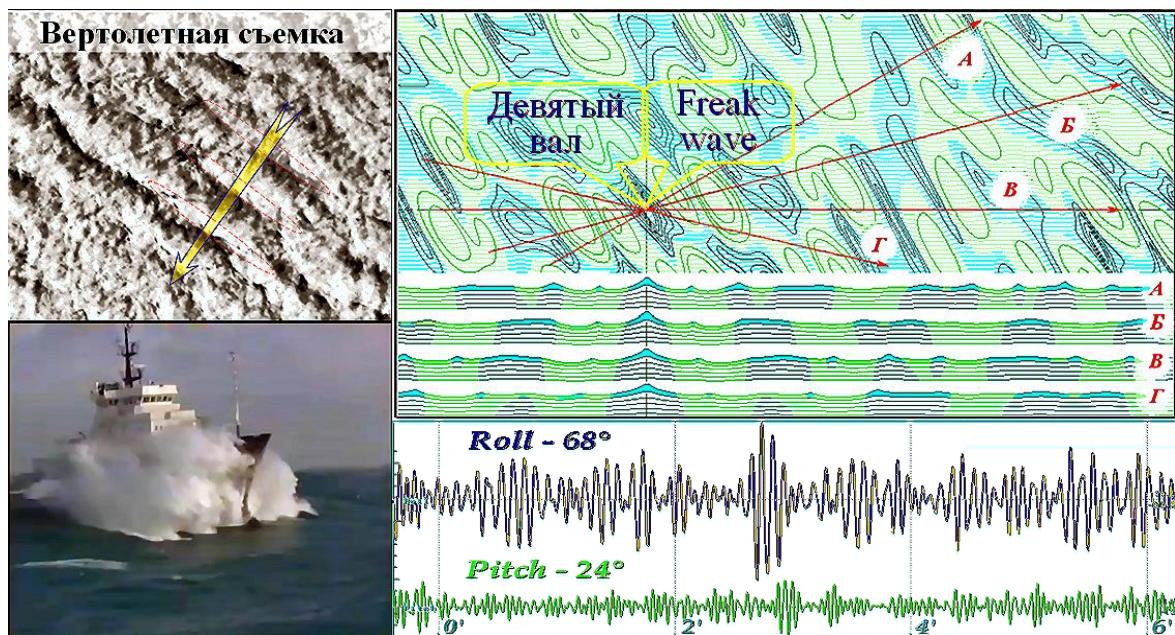


Рис. 44. Численная модель волнового поля (сверху справа) позволяет построить прогнозные профили волн, с которыми встречается судно на курсах А, Б, В и Г, отличающиеся на 15° . В центре волнового поля показан «девятый вал», от встречи с которым любое судно вполне может уклониться. Справа внизу приведены реальные записи качки судна в штормовом море с размахом по углам крена до 68° и дифферента – 24° . Слева приведены авиаасъемки волнового поля (сверху) и один кадр видео фильма о движении спасательного судна в условиях умеренного волнения

Наиболее эффективное решение проблем штормового плавания возможно только вкупе с проектированием специальной волностойкой формы корпуса корабля, чему можно найти множество прототипов в историческом кораблестроении.

В практическом судовождении традиционно ориентируются на вполне адекватные модели волнения (Рис. 44), которые представляются

в виде наложения нескольких независимых систем волн: 1) ветровое волнение совпадает с направлением действия ветра, а высота и крутизна волн могут быть предельно большими; 2) две-три системы волн зыби, являющихся отголосками ранее прошедших или отдаленных штормов, при этом длина и протяженность волн зыби существенно больше, чем у ветровых, а крутизна – меньше.

На ходу корабля 2–3 «девятых» вала проходят по борту (Рис. 44, справа вверху), и лишь после этого возможно прямое столкновение с особо крупной штормовой волной (если рулевой ведет корабль не «по кочкам»). Принимая характерный период штормовых волн Охотского моря равным 8 сек, для уклонения от жесткой встречи с крупной волной необходима заблаговременность прогноза «девятого вала» порядка 1–1,5 минут, что вполне осуществимо с помощью современных микропроцессоров.

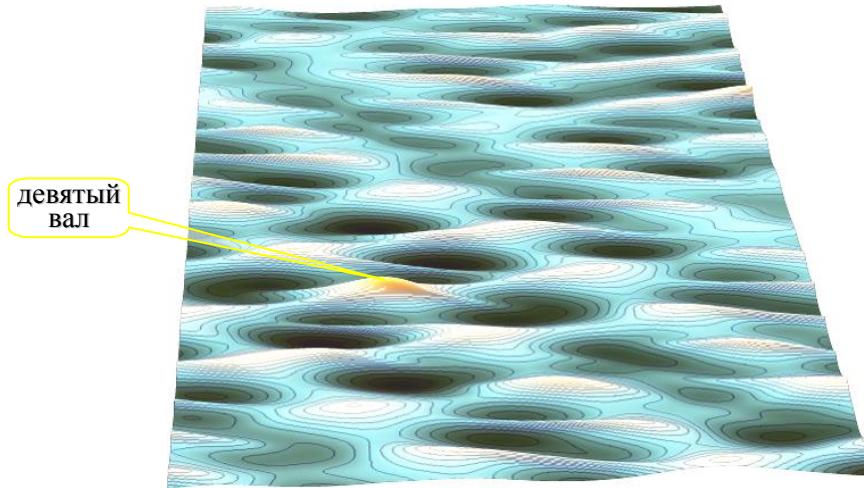


Рис. 45. Ячеисто-групповая структура морского волнения на глубокой воде, составленная по стандартным данным о волнении судового метеопоста: ветровое ($\lambda = 60\text{м}$, $\tau = 6,2\text{с}$, $h = 7,2\text{м}$, $A = 250^\circ$); первая и вторая системы зыби ($\lambda = 100\text{м}$, $\tau = 8,0\text{с}$, $h = 5,9\text{м}$, $A = 210^\circ$ и $\lambda = 160\text{м}$, $\tau = 10,1\text{с}$, $h = 5,1\text{м}$, $A = 270^\circ$). Изолинии уровня моря проведены через 1 м.

В Охотском море, с характерным периодом штормовых волн порядка 8 сек, на мелководьях можно ожидать прямые удары 12-метровых волн 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.

Трехмерная ячеистая модель групповых структур трохоидального волнения на глубокой воде (Рис. 45) удовлетворяет законам гидромеханики волн большой высоты [3], 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.

Штормовое волнение не является катастрофичным, судоводителю всегда предоставляются большие участки штормового моря, на которых отсутствуют особо крутые волны (Рис. 44), где позволительно активное маневрирование судна, в том числе для уклонения от встречи с гребнями особо крупных волн, так же, как и для предотвращения сваливания в глубокие впадины между волнами.

Важнейшим условием поддержания хорошей штормовой мореходности океанского судна является правильный учет гидродинамических свойств нестационарного трохоидального волнения с обрушающимися гребнями, в том числе сводимых к моделям автоматического управления судном в условиях интенсивного волнения, способствующих как эффективности, так и безопасности штормового плавания (*в отличие от привычных настороженностей и наставлений к пережиданию у моря спокойной погоды*).

Особенности корабельного волнообразования и влияние обводов на воздействие штормовых волн

Исходный поиск оптимальной формы корпуса корабля может выполняться на основе серии поверочных расчетов с использованием интеграла Джона Генри Мичелла [62, Michell J.H. 1898], физическая и геометрическая интерпретация которого выявляет 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.

$$A(\lambda) = \frac{M}{\lambda} \cdot \left| \int_{\Omega} q(x_0, y_0) e^{k(-z_0 + i\omega_0)} \delta\Omega_0 \right|$$

$$R_x = -\frac{\pi}{2} \cdot \rho \cdot V_0^2 \int_A^0 A^2(\lambda) \cdot \frac{\delta\lambda}{\lambda \cdot M^3 \sqrt{M^2 - 1}}.$$

Все величины в интеграле Мичелла приведены к размерным физическим функциям и аргументам: R_x – силовая реакция корабельного волнообразования на скорости хода V_0 ; $A(\lambda)$ – амплитуда излучаемой корабельной волны; $M = \sqrt{\Lambda/\lambda}$ – соотношение длин для максимальной поперечной волны Λ к расчетной фазовой волне λ ; $k = 2 \cdot \pi / \lambda = g / (V_0^2 \cdot \cos^2 \vartheta)$ – волновое число для данной фазовой волны; $\omega_0 = x_0 / M + y_0 \cdot \sqrt{M^2 - 1} / M$ – фазовый отсчет расходящейся волны с параметром отставания M для элементарного приращения интенсивности корабельной волны от локального участка корабельной обшивки с координатами x_0, y_0 .

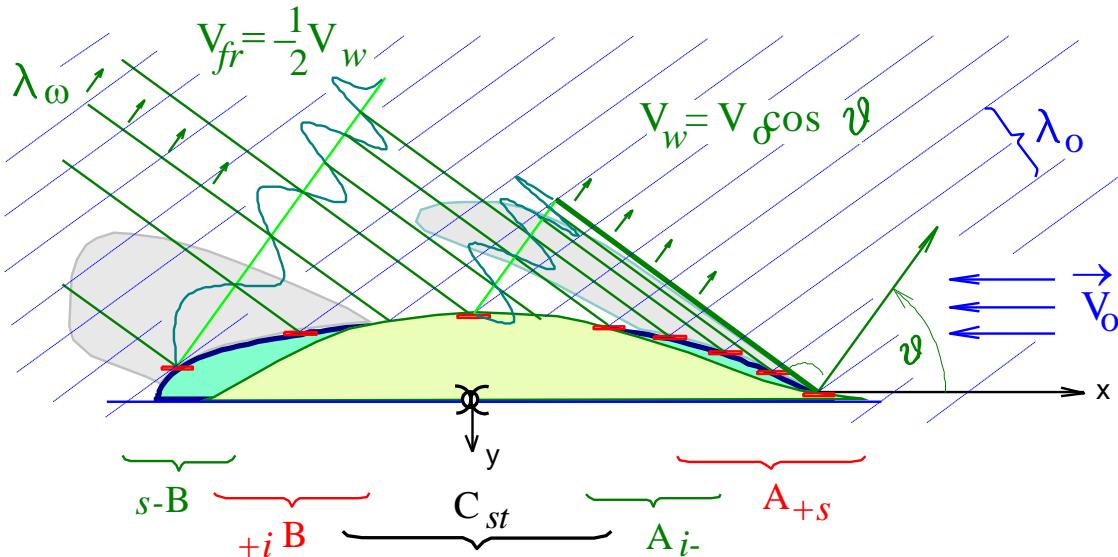


Рис. 46. Волнообразование, как процесс отражения волн от поверхности корпуса корабля. В зонах A_{+s} и $s-B$ происходит рост гребня трохоидальной волны, неспособной оторваться от корпуса судна.

Физико-геометрическая интерпретация гидродинамических процессов в интеграле Мичелла показывает механизм отражения от корпуса 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 окончностях корпуса корабельная волна не может оторваться от корпуса и волновые процессы заменяются ударным суммированием амплитуд коротких волн в форме простого источника жидкости вблизи судовой обшивки.

В частном случае оптимизация корабельных обводов сводится к поиску геометрических форм с минимальной отражающей способностью в спектре периодов штормовых волн, что создает условия для пропуска штормовой волны через корпус корабля с минимальными искажениями, и что должно обеспечиваться даже в условиях интенсивной вертикальной и килевой качки корабля на крупном штормовом волнении.

2.1. Эффективность мореходства достигается мореходными качествами судов в сложных и штормовых условиях плавания

Эксплуатационная эффективность судна всецело зависит от условий океанского плавания, от суммарной интенсивности негативного воздействия на корпус и надстройки со стороны штормового ветра и волнения. Если силовое воздействие внешней среды велико, то судно теряет возможность движения в заданном направлении и лишается возможности активного использования судовых механизмов и вооружений. Несколько проще формулируются проектные условия для плавания исключительно по тихой погоде, однако и в этом случае нельзя пренебрегать штормовой мореходностью, хотя бы для поддержания возможности своевременного уклонения от заведомо непредсказуемых опасных явлений на море.

Мореходство на Дальнем Востоке России, кроме штормовых и ледовых условий, осложняется еще и отсутствием обустроенных портов-убежищ, отчего даже на каботажных коммуникациях допустимо использование флота только с повышенными штормовыми мореходными качествами.

За редким исключением достижение оптимальной штормовой мореходности может серьезно противоречить эксплуатационным требованиям к судну как к плавучей платформе для грузов и оборудования. В реальной морской практике достижение превосходных мореходных качеств сказывается лишь на эстетическом облике судна в целом, давая

морякам подтверждение изречения, что «на борту красивого корабля нет ничего лишнего».

Режим штормового хода навстречу и по волне

Для многих современных кораблей штормование носом на волну является единственным 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. 47), постоянно подвергающихся чрезмерным перегрузкам в условиях интенсивной качки и оголения гребных винтов в кормовой оконечности корпуса. В случае аварии главной машины или рулевого устройства пассивный выход на курс 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. Килевая качка и продольные изгибные нагрузки на корпус корабля достигают на этом курсе своих экстремальных значений. 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.

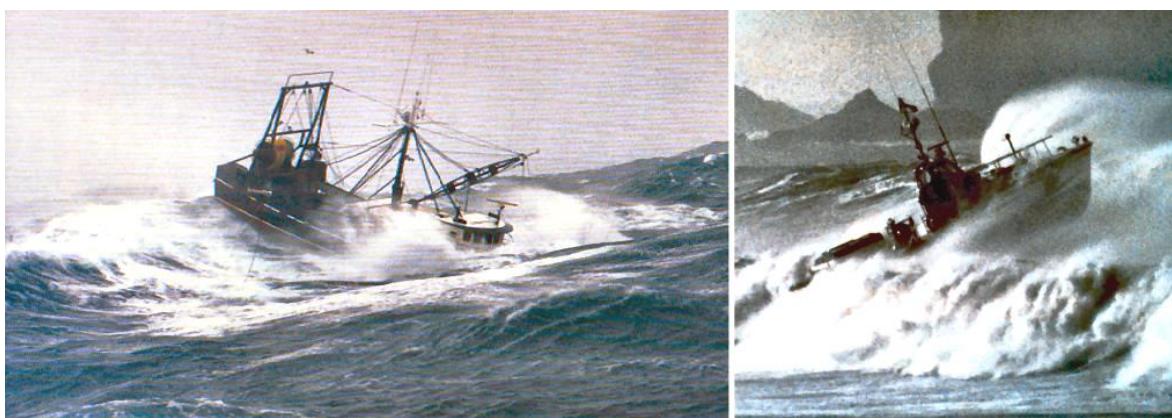


Рис. 47. Рыболовные траулеры (слева) и суда малого водоизмещения (справа) нуждаются в повышенной мощности главных двигателей для удержания штормового хода и управляемости на курсе по волне или носом на волну.

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, при котором видимый период встречных волн станет меньше собственных периодов продольной качки корпуса. Безусловно, плавности килевой качки будет способствовать заострение и уменьшение полноты носовых ватерлиний, в том числе надводных, что одновременно приведет к снижению силовых нагрузок при высокоскоростном контакте с гребнями встречных волн.

На курсе по волне килевая качка становится плавной, а судно приобретает возможность дельфинирования (Рис. 47, слева) – свободного движения 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 броучинга*).

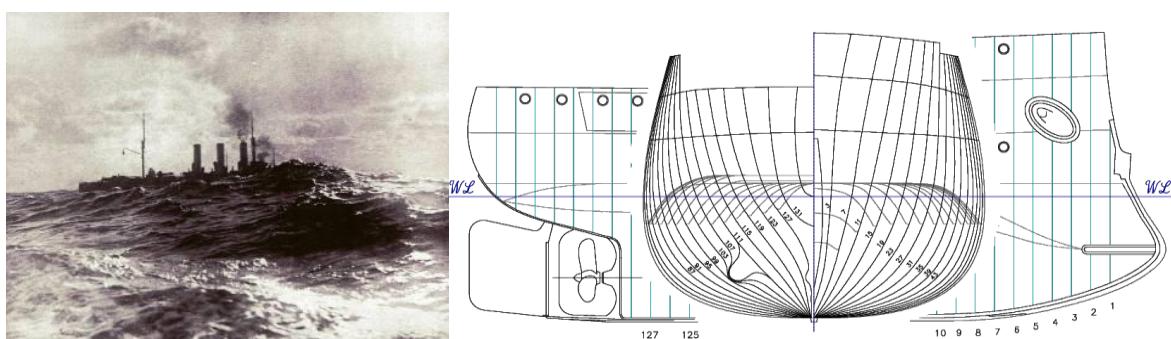


Рис. 48. Крейсер Аврора на ходу по штормовой волне (слева). Надводный объем корпуса относительно велик (справа), однако обводы в целом и форма надводного борта являются наилучшими образцами инженерной практики моряков-корабелов начала XX века

Штормовая устойчивость корпуса при плавании по волне достигается устройством узкой крейсерской кормы (Рис. 48) с относительно малым объемом и заостренными надводными ватерлиниями в кормовой оконечности. Такой корпус не допустит резкого подбрасывания кормы догоняющей волной и удержит винторулевой комплекс на достаточном заглублении, где трохоидальное поле экспоненциального снижения скорости течений под гребнями волн уменьшит опасность реверсивной работы пера руля.

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 (Рис. 49) 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 должна быть полностью 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. Однако, если надводная форма корпуса, подводные обводы и винторулевой комплекс корабля не оптимизированы специально для этого режима штормового хода, то косой курс по волне становится чрезвычайно опасным.



Рис. 49. 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 сколовых шпангоутов корпус должен иметь подводный подрез форштевня и предельно минимальный объем надводного борта выше ватерлинии (*слева*)

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 быстрой циркуляции на курс лагом к волне, сильному крену и опасности мгновенного опрокидывания под действием чисто гидродинамических сил.

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 широкобортного судна попадает наименьшее количество воды. Этому способствует 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. 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.

Безопасность корабля снова 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 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.

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. 10). В частности, 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.

2.2. Ключевые проектные решения для достижения мореходности и эффективности корабля

Корабль без бортовой качки на волнении

Патент № RU-236 0827-С2.

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. Формально из этого следует, что в открытом море судно качается настолько медленно, что периодичность воздействия океанских волн всегда чаще собственных периодов бортовой качки корабля, в том числе и на больших углах крена. Замечание о больших углах крена в проектировании формы корпуса означает малую и строго регулируемую вертикальную асимметрию подводных обводов и надвод-

ного борта, предотвращающих «ударные» гидростатические перегрузки при быстрых качаниях поверхности штормовых волн. Форма мидель-шпангоута имеет отношение ширины к осадке близкое к двум, что исключает «паразитное» возрастание плеч кренящих штормовых сил; создает малую изменчивость остойчивости формы корпуса на больших углах крена; синтезируя концептуальное построение обводов и внешнего облика судна, оптимизированного для плавания произвольным курсом относительно штормовых волн с минимальной бортовой качкой.

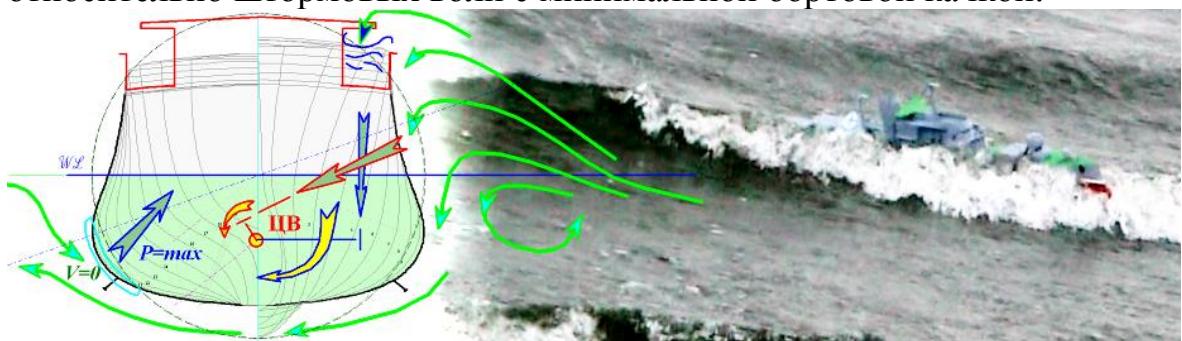


Рис. 50. Суммарные векторы сил взаимно компенсируют кренящие моменты в гидродинамическом поле штормовых трохоидальных волн – схема слева. Справа момент перехода гребня волны через палубу модели

Рассмотрим вариант всепогодного быстроходного корабля, самые первые опытные 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 градусов (Рис. 50), 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 (Рис. 10).

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 также 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.

Испытание самоходной модели корабля на регулярном волнении и в условиях волнения в открытом море в полной мере подтверждают практически полное гашение бортовой качки корабля как на ходу, так и в условиях аварийного плавания без хода [37].

Корабль без килевой качки на ходу на волнении

Заявка на изобретение: RU-2007133625 от 07.09.2007.

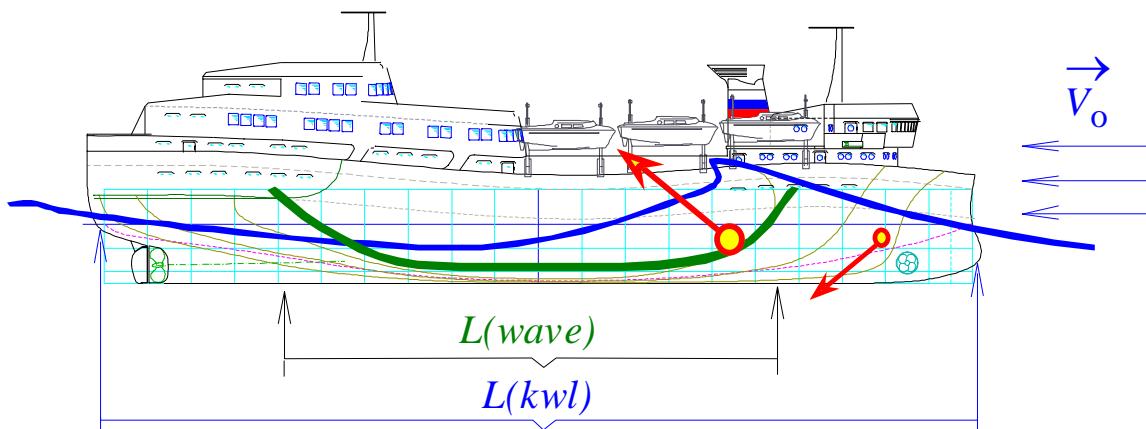


Рис. 51. Гидромеханика килевой качки интерпретируется с использованием исторического понятия волнообразующей – волновоспринимающей длины корпуса $L(\text{wave})$, за пределами которой на $L(\text{kwl})$ корпус подпадает под прямые удары прогрессивных трохоидальных волн, где склоновые обводы и низкий надводный борт должны способствовать стабилизации качки

Для компенсации килевой качки недостаточно пассивных средств минимизации внешних сил. 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.



Рис. 52. 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 преимущественно в вертикальную качку (*в качестве движителя на опытовой модели использовано жесткое машущее крыло*).

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. 51**). Проектный поиск оптимальной формы корпуса строится на исключении ходового дифферента на больших скоростях хода на тихой воде (**Рис. 52**), обеспечиваемого на всех осадках в полосе допустимой вертикальной качки корабля. Опытные испытания оптимизированных моделей показывают, что на практике энергия штормовых волн не компенсируется в полной мере, и вместо килевой начинает проявляться усиление вертикальной качки корпуса. Возможно, это является оптимизационным критерием, но все же вертикальная качка не столь сильно сказывается на снижении ходкости корабля, и в целом она не

столь сильно отражается на условиях обитаемости, не способствует ударным волновым нагрузкам на корпус корабля.

Предотвращение интенсивной килевой качки на ходу корабля способствует поддержанию очень важных мореходных качеств, и позволяет оптимизированному кораблю:

- ν – сохранять высокую скорость хода в штормовую погоду;
- ν – идти любом курсом относительно штормовой волны;
- ν – значительно снизить заливаемость верхних палуб;
- ν – полностью исключить зарываемость под встречные волны;
- ν – избежать опасные захваты корпуса гребнем большой волны;
- ν – уменьшить ускорения внутри корпуса и улучшить сохранность и надежность крепления грузов.

В случае потери хода все стабилизационные гидродинамические эффекты исчезают и корпус корабля вновь обретает вполне ощутимую килевую качку.

Повышенная штормовая мореходность корабля, высокая ходкость и минимальность килевой качки на полном ходу в условиях интенсивного волнения нередко обеспечиваются особыми кормовыми обводами для устойчивой работы винто-рулевого комплекса. В этом случае аварийные ситуации, связанные с потерей хода, усугубляются чрезмерными силовыми воздействиями штормовых волн на кормовую оконечность корабля. Однако именно интенсивное вертикальное раскачивание кормового подзора под ударами штормовых волн может эффективно использовать для приведения в действие пассивных крыльевых движителей, в качестве которых могут быть задействованы активные стабилизаторы килевой и бортовой качки корабля.

Корабль, остойчивый в штормовом плавании

Патент № 2487043 от 1 ноября 2012 г.

В концепции непротиворечивого проектирования [20] принимается за основу форма корпуса судна с заостренной крейсерской кормой и малым объемом надводного борта в носовой оконечности, что обеспечивает способность поддержанию активного хода с минимальной килевой качкой в режиме прорезания гребней штормовых волн. Такое судно имеет строевую по ватерлиниям в виде почти вертикальной прямой, и,

соответственно, ослабленное демпфирование вертикальной качки. Такому судну желательна отработка гидростатических решений 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, характерно плавание с интенсивной килевой качкой при отслеживании корпусом поверхности штормового моря во избежание заливаемости верхних палуб. В таком режиме существенно гидродинамическое влияние завышенных надводных объемов в оконечностях при посадках корпуса на гребне и над подошвой штормовых трохоидальных волн. Тем не менее, гидростатический подход к рассмотрению данной проблемы не противоречит осуществлению предложенной схемы построения корпуса судна, в том числе в компромиссе с использованием развала борта [5, стр. 137] на уровне конструктивной ватерлинии.

Проектная инженерная и морская практика.

Гидродинамика силового воздействия штормовых волн на морское судно не ограничивается влиянием обводов корпуса с четко означенной ватерлинией. В штормовом море действующая ватерлиния мечется между уровнями подводных склонов и палубой, определяя, тем самым, непредсказуемость силового воздействия волн на корпус судна в целом, с принципиальной возможностью возникновения разрушительных гидродинамических ударов на плоскостях верхней палубы и разваленных поверхностях бортовой обшивки судна.

Для достижения плавности качки в штормовом плавании судоводитель старается минимизировать поперечную остойчивость корабля. Судовые обводы с минимальной остойчивостью на конструктивной осадке, в том числе, способствуют уменьшению внешних кренящих сил в штормовом плавании, однако нуждаются в дополнительных конструктивных решениях для сохранения остойчивости в условиях вертикальной качки.

Настоящим изобретением определяется способ достижения положительной остойчивости корпуса в условиях вертикальной качки в штормовом плавании, для чего выявляются проектные особенности формы корпуса в полосе действующих ватерлиний, которые способ-

ствуют безусловному сохранению остойчивости в условиях интенсивной вертикальной качки, что в свою очередь необходимо для безопасного снижения метацентрической высоты с целью минимизации вынужденной и исключения резонансной бортовой качки в штормовом море.

В соответствие с общей концепцией непротиворечивого проектирования корабля повышенной штормовой мореходности [61] рассматривается форма корпуса с заостренной крейсерской кормой и малым объемом надводного борта в носовой оконечности корабля, способного к поддержанию активного хода с минимальной килевой качкой в режиме прорезания гребней штормовых волн. Для проекта корабля с такой формой корпуса, отличающегося почти вертикальной строевой по ватерлиниям и ослабленным демпфированием вертикальной качки, настоящее изобретение имеет наибольший положительный эффект.

Морское судно представляется динамически противоречивым объектом, в котором стремление к улучшению какого-либо одного мореходного свойства обязательно откликается ослаблением, вплоть до неразрешимых эксплуатационных проблем с мореходностью этого судна в целом.

Так, любое стремление к усилинию начальной статической остойчивости обязательно приводит к усилинию качки этого судна в штормовом плавании, вплоть до возникновения катастрофических проблем с прочностью корпуса, или, что является чистым парадоксом – возникновению опасности именно опрокидывания судна в результате возникновения сильной резонансной качки или жесткого гидродинамического захвата корпуса судна штормовой волной – брочинга.

Значительные сложности в эксплуатации судов возникают при несоизмеримом завышении надводного борта и запаса плавучести судна, при реализации других несогласованных с мореплавателями требований по незаливаемости верхних палуб, в устройстве громоздких спасательных сооружений, которые могут обращаться источником повышенной опасности для мореплавателей.

Особенности гидростатики судна повышенной мореходности.

Штормовая гидромеханика судна включает некоторые проектные парадоксы, существенно влияющие на мореходные качества неоптимизированного судна, и, по сути, определяющие возможность или особые

режимы всепогодной эксплуатации судна в соответствии с его проектным назначением, и без ущерба для безопасности груза и собственно самого судна.

Некоторые элементы в построении формы корпуса судна хорошо зарекомендовали себя в истории мореплавания, а ныне их использование отчасти ослаблено в угоду технологичности грузообработки, для расширения внутрисудовых помещений, иногда же просто по эстетическим пристрастиям конкретных менеджеров корабельных наук.

Выявление и оптимальное разрешение парадоксов гидромеханики формально 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 :

$$r = J_x/V = \frac{2}{3} \int_{x_k}^{x_H} y^3 dx \Big|_{WL} \quad (1)$$

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 взволнованного моря обращаются ничем не скомпенсированными моментами остойчивости формы:

$$m_g = \gamma \cdot r \cdot V \cdot \sin(\vartheta) = \gamma \cdot J_x \cdot \sin(\vartheta) \quad (2)$$

где: $\gamma = 1025 \text{ кг}/\text{м}^3$ – плотность, ϑ – угол наклона поверхности моря.

Обратим внимание, что эти силы не сдерживаются реакцией массы корпуса, и достигают наибольших величин у судов с широкой транцевой кормой (Рис. 53), и особо опасны для многокорпусных судов, вне прямой зависимости от реальной площади их действующих ватерлиний, так как в расчеты метацентрического радиуса входят кубические ординаты габаритных размерений.

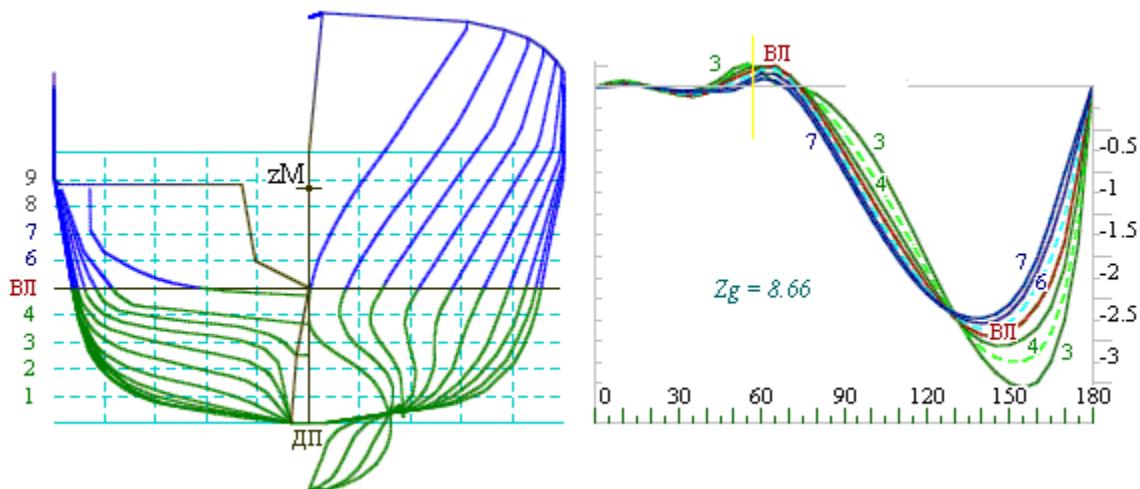


Рис. 53. Диаграммы статической остойчивости корабля для пяти штормовых ватерлиний, с аппликатой центра тяжести зафиксированной в метацентре на конструктивной осадке. Естественное устойчивое положение корпуса – «кверху килем»

Метацентрические проектные предпосылки не противоречат последующим результатам гидростатических расчетов на больших углах крена. Чтобы иметь возможность оценки остойчивости судна как твердого тела в штормовом море, зафиксируем центр тяжести в метацентре для конструктивной осадки.

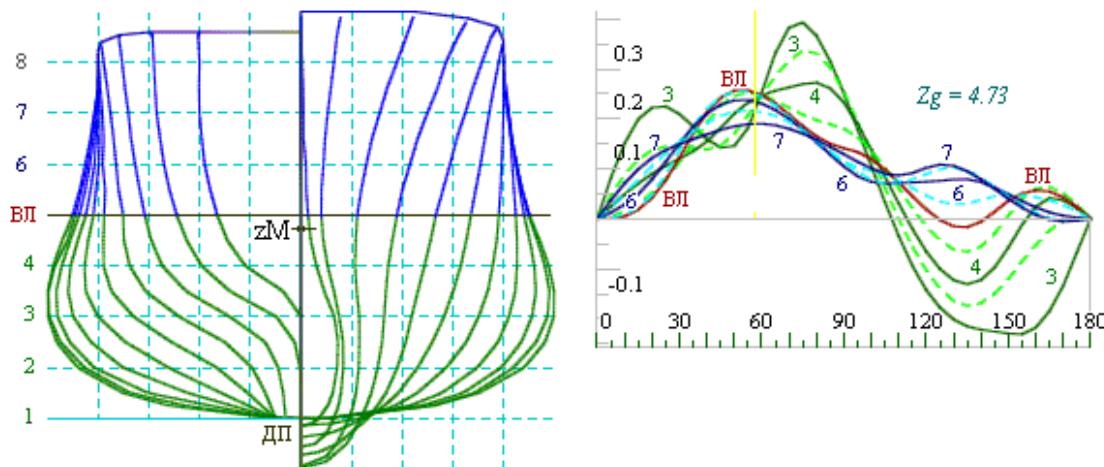


Рис. 54. Метацентрическая высота оптимизированного корабля может безопасно приводиться к нулю на конструктивной осадке, так как положительная остойчивость восстанавливается при любых изменениях посадки в темпе штормовой качки судна. Такой корпус имеет большой запас для поддержания абсолютной остойчивости, достаточной для выхода на ровный киль даже из полного опрокидывания.

Для достижения плавности бортовой качки в штормовом плавании судоводитель всегда стремиться уменьшить метацентрическую высоту, приподняв центр масс судна ближе к метацентру (**Рис. 54**), тем самым добиваясь плавности качки за счет подавления внешних сил инерцией массы корпуса, что описывается капитанской формулой для оценки начальной остойчивости:

$$T_g = C \cdot B / \sqrt{h} = C \cdot B / \sqrt{r + z_C - z_g} \quad (3)$$

где: $C \approx 0,8$ [с/м^½] – 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, то судно как бы оказывается в качелях интенсивной качки еще и под боковыми ударами штормовых волн.

Контуры шпангоутов в средней части оптимизированного судна (**Рис. 54**) приближены к окружности, что отмечается отношением ширины к осадке (В/Т) 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) в гидростатическом приближении.

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.

Это не исключает поиска проектных решений по минимизации внешних сил при комплексном рассмотрении гидромеханики корпуса в условиях интенсивного трохоидального волнения, в котором известны эффективные инженерно-технические решения по минимизации внешних силовых воздействий для существенного снижения килевой и бор-

товой качки судна, о которых сообщалось на морском форуме STAV-2009 (Khramushin, 2009) в Репино [20].

Здесь же вернемся к уточнению гидростатических оптимизационных решений для конкретных проектов морских судов повышенной штормовой мореходности, определяющих выбор формы корпуса без недочетов в «опасную сторону», что обычно свойственно для проектных выводов на основе простейшей модели с гидростатической постановкой судна на штормовую волну.

Корабль, остойчивый в штормовом плавании

Патент № RU 2487043 С2.

Ожидаемый технический результат представляется в виде водоизмещающего корабля с относительно большой осадкой, заостренными оконечностями и запасом плавучести для надводного плавания, сосредоточенным в средней части корпуса, отличающийся тем, что на конструктивной осадке метацентрическая высота (начальная остойчивость) минимальна, и возрастает при любом изменении посадки в процессе всплытия и погружения корпуса в условиях вертикальной качки на штормовом волнении, что достигается за счет специальных обводов в полосе переменных ватерлиний.

Переходя к рассмотрению формы корпуса и общекорабельной архитектуры конкретных морских судов, ограничимся способами построения судовых обводов лишь в средней части корпуса, что достаточно для поддержания гидростатических условий безусловно положительной начальной остойчивости при интенсивной вертикальной качке в условиях штормового волнения.

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 оказывается смещение центра величины z_C , отчасти компенсируемое обратной зависимостью синхронно меняющегося объемного водоизмещения V . Зафиксируем также положение центра тяжести и допустим условно неизменной величину поперечного

(относительно продольной оси x) момента инерции площади действующей ватерлинии J_x :

$$h = z_M - z_g = r + z_C - z_g = J_x/V + z_C - z_g, \quad (4)$$

где: z_M – аппликата метацентра; z_g – фиксированная аппликата центра масс корабля; r – поперечный метацентрический радиус.

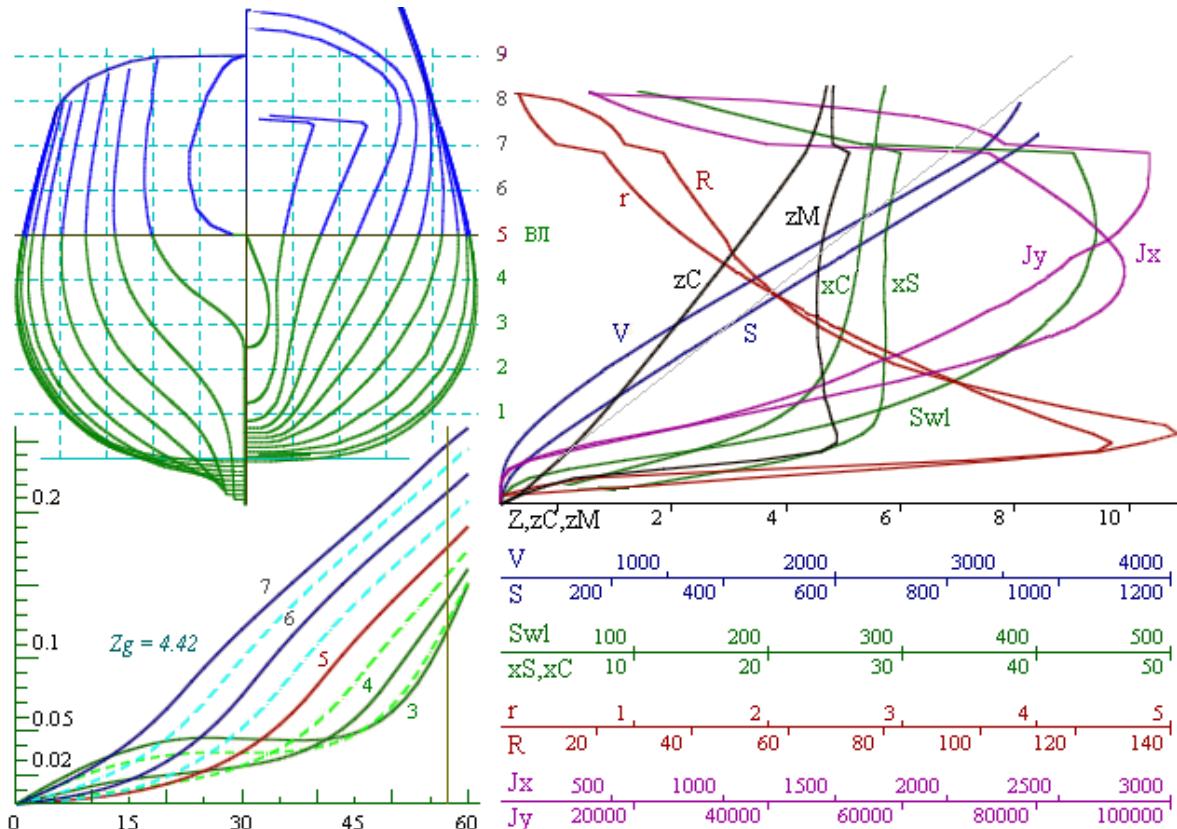


Рис. 55. Проекция корпус теоретического чертежа и гидростатические расчеты для спасательного судна, способного в штормовых условиях активно маневрировать произвольными курсами на малых ходах вблизи спасаемого судна или морского инженерного сооружения

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. 55, 56 – справа).

В случае судовых обводов с вертикальными бортами в средней части корпуса, искомый экстремум минимума аппликаты метацентра z_M приходится на осадку T приблизительно 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. 55, 56 – справа).

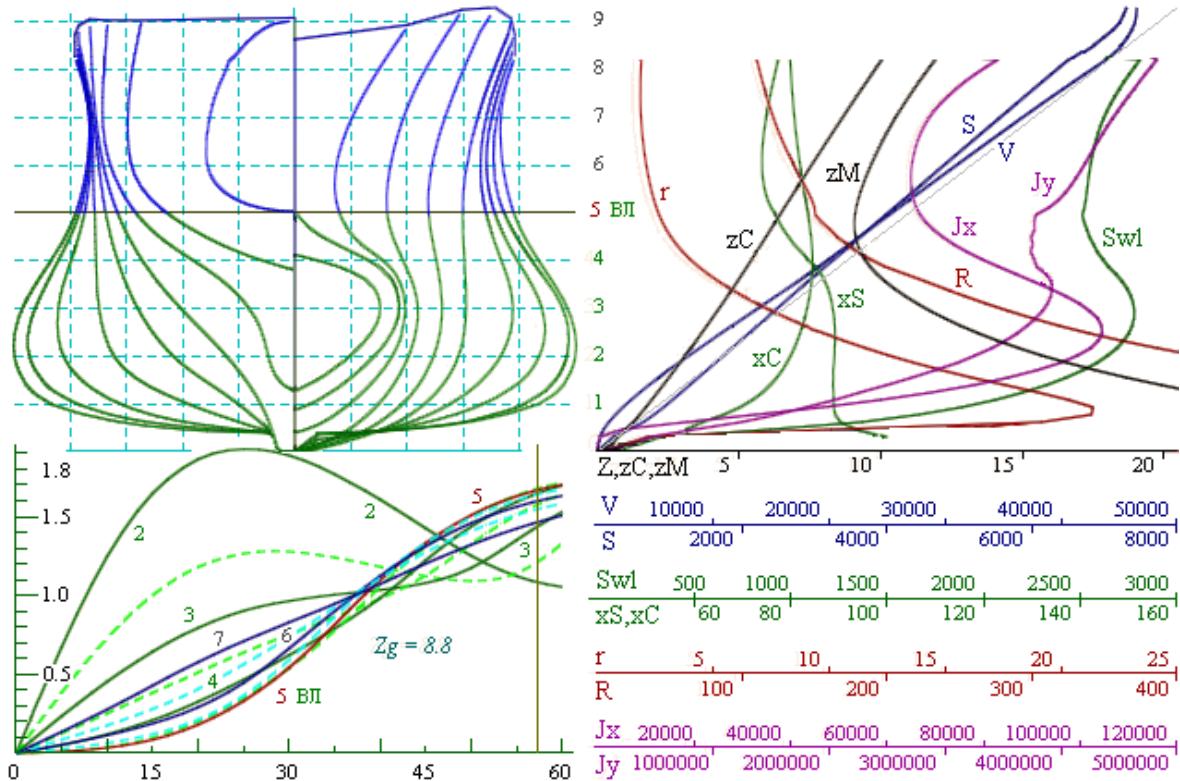


Рис. 56. Универсальное транспортное судно, способное к штормовому плаванию произвольным курсом с минимальной килевой и бортовой качкой в условиях интенсивного морского волнения. Диаграммы плеч остойчивости (слева) для различных осадок, отмеченных на проекции корпуса теоретического чертежа (слева вверху). Расчет остойчивости выполнен для $Z_g=Z_m$ на конструктивной осадке (ВЛ). При всех изменениях осадки корпус приобретает положительную начальную остойчивость. Кривые элементов теоретического чертежа (справа). Здесь и далее на графиках приведены z_C , z_M – аппликаты 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

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.

Судно повышенной штормовой мореходности, имеющее отношение ширины корпуса к осадке приблизительно равное или меньшее двух ($B/T \leq 2$), 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 ослабляют эффект повышения остойчивости при изменении осадки (Рис. 55), 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. 56).

Краткое описание чертежей

Безусловная остойчивость в условиях штормового плавания обеспечивается формой обводов корпуса в полосе переменных ватерлиний. Эффект достигается для различных вариантов судовых обводов: в меньшей степени для корпусов с округлыми шпангоутами (Рис. 55); в наибольшей – с вогнутыми контурами шпангоутов на уровне конструктивной ватерлинии (Рис. 56).

Количественная характеристика формы (Рис. 55, 34 – справа) связана с условием взаимной компенсации изменений момента объема корпуса $z_C \cdot V$ 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, численное решение которой реализовано в программе для ЭВМ – Hull, № Г/р 2010615849.

На диаграммах статической остойчивости (Рис. 55, 34 – слева внизу), построенных для различных посадок корпуса при фиксированной аппликации центра масс, график с нулевой метацентрической высотой (5) соответствует конструктивной осадке, другие графики (3,4 и 6,7) – показывают восстановление положительной начальной остойчивости при всплытии и погружении корпуса на уровень соответствующих ватерлиний.

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 аппликации 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 [5].

Заключение.

В работе показаны основные пути для начальной оптимизации элементов формы корпуса корабля на основе гидростатических расчетов, обеспечивающих вполне достоверные количественные оценки для принимаемых инженерных решений.

В частности: судовые обводы с округлыми шпангоутами в средней части корпуса ослабляют эффект улучшения остойчивости при изменении посадки, и потому реализация изобретения становится особо значимой для поддержания остойчивости формы корпуса в штормовом плавании. Максимальный эффект повышения остойчивости при штормовом изменении посадки достигается, если контуры шпангоутов в средней части корпуса имеют вогнутость на уровне действующей ватерлинии (Рис. 56), что одновременно значительно снижает опасность опрокидывания судна при потере остойчивости. Количественная характеристика

остойчивости связана с условием взаимной компенсации изменений момента объема корпуса $z_C \cdot V$ относительно основной линии за счет момента инерции площади действующей ватерлинии J_x . Геометрически оптимизация сводится к выбору наклона борта в средней части корпуса на уровне конструктивной ватерлинии.

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.

Изобретение относится к областям наук о кораблестроении и судовождении в сложных, штормовых и ледовых условиях мореплавания [50], и представляется результатом математических и экспериментальных исследований в области целевого непротиворечивого проектирования корабля для штормовых и ледовых условий мореходства на Дальнем востоке России, в полярных акваториях Арктики и Антарктики.

Объектом изобретения является построение надводного борта и верхней палубы корабля, с проектным обоснованием необходимости завала и снижения высоты борта, с одновременным уменьшением ширины и площади прилегающих фрагментов верхней палубы, которые в штормовом плавании должны равномерно нагружаться потоками воды из гребней особо крупных волн. Технический результат изобретения служит достижению частичной компенсации внешнего кренящего и дифферентующего воздействия на корпус корабля под ударами гребней штормовых волн, что способствует поддержанию ходкости и маневренности корабля при сниженной интенсивности килевой и бортовой качки корабля в целом.

Надводный борт и верхняя палуба корабля, проектируемые с учетом необходимости достижения высоких мореходных качеств и эксплуатационных свойств в условиях штормового мореплавания, в однокорпусном исполнении настраиваются на удлиненных и хорошо обтекаемых обводах с относительной осадкой порядка половины ширины корпуса, и отличаются тем, что:

- высота надводного борта по всему периметру оптимизируется из условия равномерной заливаемости верхней палубы для компенсации дифферентующих и кренящих воздействий штормовых волн;
- в условиях заливаемости основная масса воды удерживается на прилегающем участке верхней палубы с помощью: 1) вдолькорпусных рубок и фальшбортов с портиками; 2) заниженного форштевня и высокого волнолома на баке; 3) узкой крейсерской кормы и бортовыми уступами у транца, снижающими риск брочинга;
- устраивается допустимо низкая высота борта, с относительно малой шириной и площадью прилегающей палубы, либо с ощутимым завалом борта для уменьшения общей ширины верхней палубы. Объемные надстройки и широкие палубы, по необходимости, устраиваются выше над открытой верхней палубой.

Назначение. Проектно-технические решения ориентированы на достижение эффективности мореходства и ведения морских работ, в полной мере востребующих практическое согласование мореходных качеств корабля для конкретных условий эксплуатации, регулируемых судовыми расписаниями и распоряжениями командного состава в обеспечение судовых работ в особых и штормовых условиях плавания.

Специализированный океанский флот повышенной мореходности для каботажных линий Сахалина и Курильских островов должен создаваться по особым проектам, согласованным с региональными мореплавателями, разрабатывающими практические наставления по судоходству и отвечающим за всесезонное и всепогодное обеспечение морских работ и транспортных коммуникаций.

Важным фактором достижения повышенной мореходности является удаленность или отсутствие портов-убежищ для своевременного укрытия дальневосточного флота, который при поступлении штормовых предупреждений уходит из гаваней в открытое море.

Уровень техники.

Непротиворечивое проектирование в кораблестроении оперирует инженерными подходами к оптимизации обводов и общекорабельной архитектуры всепогодного судна, способного к активному использованию палубных устройств и высокотехнологичного бортового оборудования в условиях штормовой качки и холодных ветров северных морей [63, 64].

В качестве концепции проектирования обводов и формы корпуса корабля используются инженерно-технические принципы [65] непротивления силовому воздействию гребней волн и штормового ветра, что способствует гидродинамической взаимокомпенсации всех видов качки, обеспечению комфортности обитания экипажа и безусловной безопасности крепления грузов и судового оборудования.

Прототипом первого инженерного решения (Рис. 57) следует полагать изобретение RU-2384456 – «Корабль гидографической и патрульной службы» [42], в котором определяется назначение и эксплуатационные особенности корабля повышенной штормовой мореходности. Аналогом для варианта низкобортного рыболовного судна (Рис. 58) представляется изобретение RU-2535382 – «Рыболовное судно северных морей» [44], отличающееся существенным уменьшением высоты борта и увеличением площадей верхних палуб, что важно для дополнительного задействования разнообразных рыболовных снастей, сетевых неводов и других орудий лова в течение одной рыбопромысловой экспедиции.

Историческими аналогами настоящих проектно-технических решений можно определить построения добротных кораблей и судов конца XIX – начала XX веков, отличавшихся занижением и завалом надводного борта и штевней, что также создавало условия для достижения ходкости и управляемости в условиях штормовых ветров и интенсивного волнения открытого моря.

Осуществление изобретения.

Борт и палуба корабля представляются главными проектными компонентами обеспечения эксплуатационных и мореходных качеств в условиях мореплавания на интенсивном волнении, геометрические характеристики которых должны особо согласовываться по навигационным условиям и эксплуатационным требованиям к кораблю в различных

гидрометеорологических или штормовых регламентах ведения морских работ.

Настоящее изобретение основывается на традиционной архитектуре однокорпусного водоизмещающего корабля, построенного на хорошо обтекаемых обводах с относительной осадкой порядка половины ширины корпуса на уровне конструктивной ватерлинии.

Предметом новых разработок являются надводный борт и прилегающие фрагменты верхней палубы, оптимизируемые 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 площадей прилегающих к борту фрагментов верхней палубы:

- высота надводного борта по всему периметру корпуса корабля оптимизируется из условия равнобъемной 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 подlamывается 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, или установкой палубных рубок и громоздких судовых устройств, не допускающих удержание на верхней палубе вихревого водоворота из попутных греб-

ней 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.

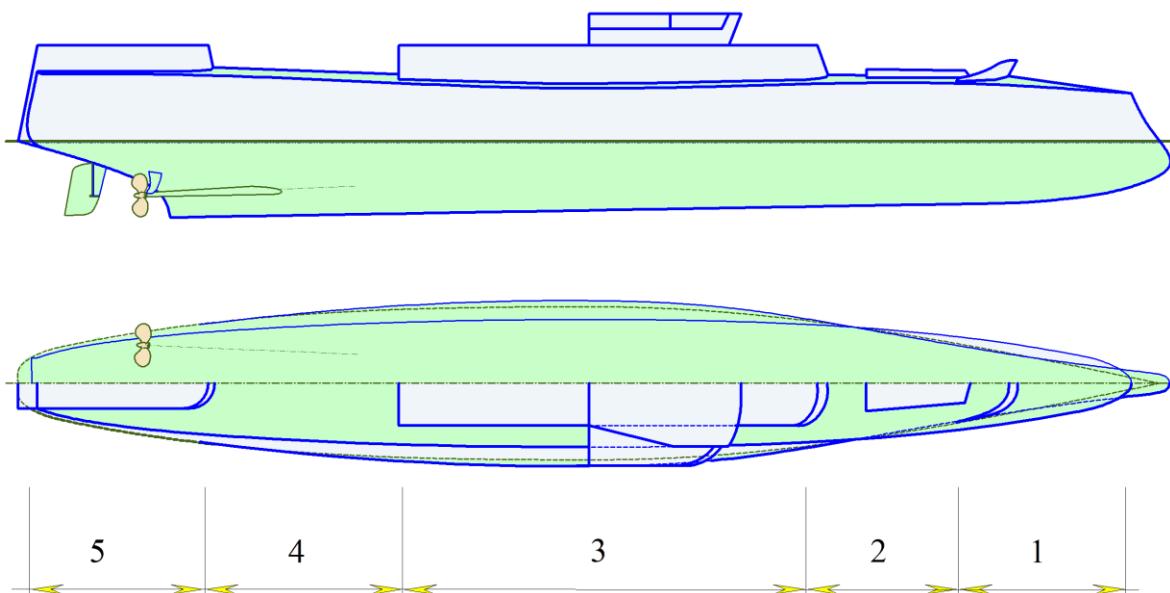


Рис. 57. Вариант инженерного построения и геометрической оптимизации корпуса корабля с относительно высоким и заваленным внутрь надводным бортом, со значительно зауженной шириной верхней палубы. Форштевень предельно малой высоты и сильно завален, что служит обеспечению штормовой ходкости в режиме прорезания гребней особо крупных волн. Длинная вдолькорпусная рубка предотвращает перехлест гребней штормовых волн через всю палубу корабля в средней части корпуса.

На двух чертежах приведены варианты формирования надводного борта и верхней палубы корабля. В первом варианте корабль построен с относительно высоким надводным бортом с завалом, что также способствует заметному уменьшению ширины верхней палубы (**Рис. 57**). Вариант рыболовного судна (**Рис. 58**) с предельно низким надводным бортом и максимально широкой рабочей палубой. Проектными решениями достигается возможность всесезонного и всепогодного выполнения палуб-

ных и забортных работ в особых навигационных и гидрометеорологических условиях, под штормовым ветром и на интенсивном волнении открытого моря.

На чертежах размечены характерные участки верхней палубы, отвечающие функциональному предназначению корабля:

1. Повышенная заливаемость бака ограничивает доступ команды для обслуживания палубных устройств, что востребует задействование дистанционного управления якорно-швартовными устройствами, так же как и использовании систем постановки – выборки забортных устройств специального назначения.

2. На носовой палубе корабля (Рис. 57), за волноломом, располагаются горловины трюмов и барбеты вооружений, у рыболовного судна (Рис. 58) этот участок носовой палубы укрывается герметичной надстройкой;

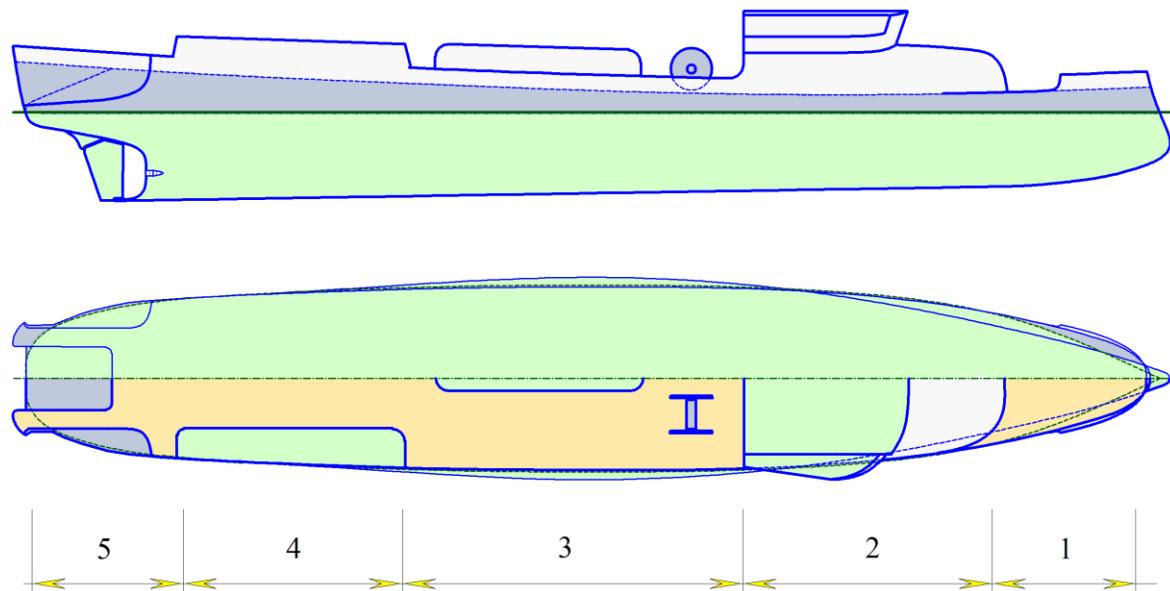


Рис. 58. Формирование общекорабельной архитектуры рыболовного судна с предельно низким надводным бортом для обеспечения эффективной и безопасной работы траловой команды в условиях штормовых ветров и интенсивного волнения на море. Необходимый запас плавучести обеспечивается включением в герметичный контур корпуса носовой надстройки и палубных тамбуров.

3. В средней части корпуса высокобортного корабля (Рис. 57) располагается протяженная рубка, препятствующая перетоку воды по верх-

ней палубе на подветренный борт. На широкой промысловой палубе рыболовного судна (Рис. 58) за фальшбортами укрываются громоздкие траловые и кабельные лебедки, которые разделяются удлиненной тамбуиной 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 (Рис. 57). На рыболовном судне (Рис. 58) в укрытом бортовыми тамбуинами 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 крма подвергается интенсивному воздействию штормовых волн с высокой заливаемостью верхней палубы. По первому варианту (Рис. 57) 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. 58) – слип кормового трала, зона повышенного внимания экипажа и траловой команды, особенно в моменты подъема трала, когда судно становится на курс по волне.

Заключение.

Настоящее изобретение востребуется в проектно-технических решениях для достижения умеренной качки при повышенной ходкости и маневренности корабля в условиях интенсивного волнения, что крайне актуально для всепогодного мореходство в дальневосточных морях России.

Перечисленные инженерные решения наиболее эффективны в случае комплексного применения, с оптимизацией их геометрических размерений и инерционных характеристик для конкретных географических регионов и навигационных условий эксплуатации проектируемых кораблей и судов.

Носовая оконечность быстроходного надводного корабля или относительно тихоходного гражданского судна повышенной штормовой мореходности и ледовой проходимости в автономном плавании – «Форштевень и скулья корабля»

Патент № RU-2607136.

Форштевень и скульевые обводы быстроходного надводного корабля или относительно тихоходного гражданского судна, повышенной штормовой мореходности и ледовой проходимости в автономном плавании, отличающиеся:

- вертикальным или заваленным в корму прочным и заостренным штевнем от уровня палубы бака, вниз до таранного упрочнения на глубине порядка половины осадки;
- со штормовым подрезом в нижней части форштевня от гладкого слияния с килем и наклоном порядка 20-30° от горизонтали в таранной точке вертикального сопряжения;
- с особым упрочнением таранной части форштевня для безопасной остановки корабля при столкновении с ледовыми полями и торосами;
- надводные ветви носовых шпангоутов могут иметь небольшой развал для быстроходного корабля, либо заниженную высоту с повсеместным завалом борта для тихоходных судов;
- начиная от бульбового утолщения (таранного упрочнения) строится винтовая поверхность обшивки до зоны отрыва расходящейся корабельной волны (соизмеримой по длине с внешними штормовыми волнами);
- далее винтовая поверхность уходит под днище, а на уровне переменных ватерлиний начинается выпуклый изгиб шпангоутов с образованием булей и завала борта в средней части корпуса.

Форштевень и скула корабля выбираются с учётом особенностей судовождения в сложных, штормовых и ледовых условиях мореплавания на Дальнем востоке России, в полярных акваториях Арктики и Антарктики. Ожидается улучшение ходовых и маневренных качеств на интенсивном штормовом волнении; умерение всех видов качки; снижение риска обледенения верхних палуб, что достигается следующими гидродинамическими особенностями форштевня и скуловых обводов:

- заваленным или вертикальным форштевнем для безударного прорезания гребней штормовых волн; с возможностью движения во льдах в режиме ледореза; при поддержании остойчивости на изначально низком или нулевом уровне;
- со штормовым подрезом в нижней части форштевня для раскрытия рыскания в условиях интенсивной бортовой и килевой качки при активном движении на штормовом волнении;
- с упрочнением нижней части форштевня, создающей упор в основание ледового поля, где лед разогрет до температуры воды, и заостренной надводной частью форштевня-ледореза, раскалывающего ледовое покрытие с повышенной хрупкостью при низких температурах воздуха;
- надводные ветви шпангоутов оптимизируются от небольшого развала, стабилизирующего активный штормовой ход; до их завала со снижением высоты бака для компенсации килевой качки за счет заливаемости носовой палубы тихоходных судов;
- бульбовое образование задает начало винтовой поверхности на уровне переменных ватерлиний от форштевня до зоны отрыва расходящейся корабельной волны, что компенсирует силовое воздействие встречных штормовых волн и служит уменьшению ходового дифферента;
- за зоной отрыва корабельной волны начинается выпуклый изгиб шпангоутных контуров с формированием завала борта и подводных булей в средней части корпуса, что снижает бортовую качку в штормовых условиях.

Перечисленные инженерные решения для форштевня и скуловых обводов наиболее эффективны в случае комплексного применения, с оптимизацией их геометрических параметров для конкретных географических условий.

ских и навигационных условий эксплуатации проектируемых кораблей и судов.

Технические особенности форштевня и сколовых обводов.

В частном случае оптимизация обводов сводится к поиску геометрических форм с минимальным ходовым дифферентом и корабельным образованием на всех, включая закритически высоких, скоростях хода по тихой воде, при основных посадках, возникающих в процессе вертикальной качки в штормовом море, что согласно гипотезе об обратимости физических процессов излучения и отражения корабельных и штормовых трохоидальных волн, ожидается построение обводов, обладающих свойством пропуска штормовой трохоидальной волны через корпус корабля с минимальными искажениями, что должно обеспечиваться в условиях интенсивной вертикальной и килевой качки на крупном штормовом волнении. Вычислительные эксперименты и мореходные испытания по моделированию корабельного волнообразования и воздействия на корпус трохоидальных штормовых волн [61] показывают результаты чувствительные к изменению носовых обводов, что и позволяет математически определиться с экстремальными функционалами и осмысленными инженерными решениями в оптимизационной задаче о наилучшем построении носовой части корпуса корабля. Вычислительные эксперименты по моделированию корабельного волнообразования от кормовой части корабля крайне зависят от продольного и вертикального распределения источников волнового излучения, что формально делает оптимизационную задачу плохообусловленной, и потому в расчетах использовались более жесткие оптимизационные функционалы, раздельно для носовой и кормовой оконечностей корабля, в которых не учитывается интерференция корабельных волн, излучаемых от источников в носовой оконечности, и стоков – в кормовой.

Предлагаемая в настоящем изобретении носовая оконечность корабля оптимизирована преимущественно для автономного плавания в условиях интенсивного волнения под ураганными ветрами открытого океана [20, 44], с возможностью автономного хода во льдах (класс УЛ или УЛА) средней сплоченности до 8-9 баллов, в том числе со скоростью шесть и более узлов под проводкой ледокола.

Прототипом настоящего инженерного решения следует полагать изобретение RU-2384456 – «Корабль гидрографической и патрульной службы» [42], в котором определяется назначение и эксплуатационные особенности корабля повышенной штормовой мореходности. Аналогом для варианта тихоходного судна представляется изобретение RU-2535382 – «Рыболовное судно северных морей» [44], с форштевнем, обеспечивающим режим ледореза, и не теряющим остойчивости при давлении форштевнем на тяжелые ледовые поля, что очень важно для судов с предельно малой начальной остойчивостью по условиям минимизации качки в штормовом плавании. Историческими аналогами для выбранных технических решений по форме форштевня, скулы и носовых обводов корпуса являются добрые корабли и суда конца XIX – начала XX веков, в построении формы носовых обводов у которых можно отметить промежуточные технические решения между определенными в настоящем изобретении вариантами быстроходного корабля и тихоходного судна.

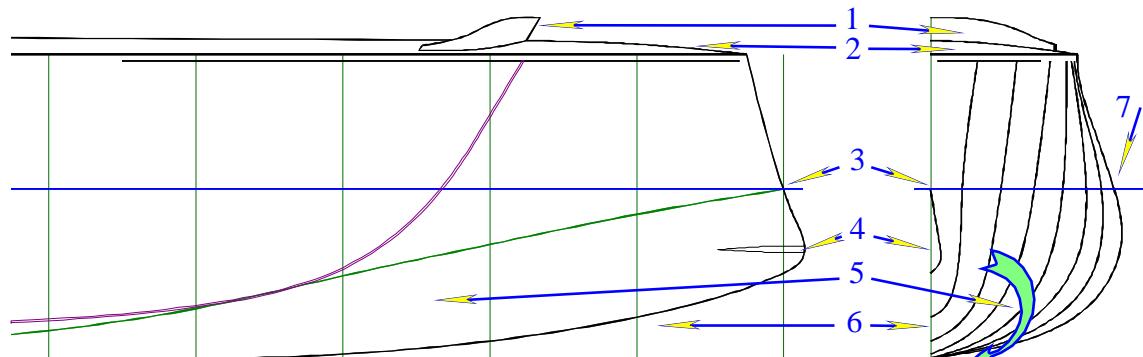


Рис. 59. Носовая часть корпуса быстроходного корабля, способного активно маневрировать в условиях ураганных ветров, штормового волнения и автомонного плавания в обстановке средней ледовой сплошности.

На чертежах цифрами отмечены следующие конструктивные особенности судовых обводов в носовой части корпуса:

1. Волнолом быстроходного корабля (Рис. 59) и лобовая переборка шельтердечной надстройки тихоходного транспортного судна (Рис. 60), укрывающих экипаж от прямых ударов волн при необходимости работы на верхней палубе в свежую погоду;

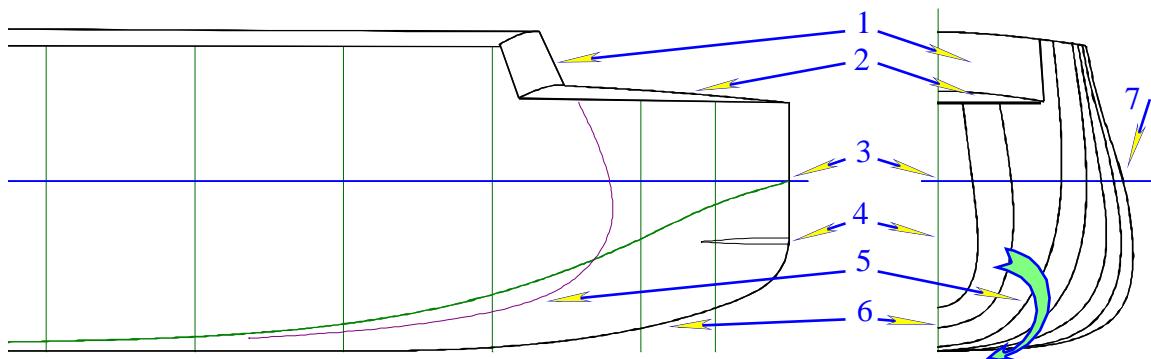


Рис. 60. Носовая часть корпуса тихоходного транспортного судна, способного удерживать заданное направление движения относительно малыми ходами в условиях ураганных ветров, штормового волнения и автономного судоходства в обстановке средней ледовой сплошности.

2. Существенное уменьшение надводного объема в носовой части корпуса устраивается из принципа гидродинамической (Рис. 59) и гидростатической (Рис. 60) 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 винтовую 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 скучловой 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 не-проходимыми 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.

Осуществление изобретения.

Форштевень и скуловые обводы быстроходного надводного корабля (Рис. 59) или относительно тихоходного гражданского судна (Рис. 60) 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. 59) или относительно тихоходного гражданского судна (Рис. 60) должны строиться с использованием следующих инженерно-технических и конструктивных элементов в устройстве форштевня, скуловых обводов и надводной части носовой оконечности корпуса:

- установка вертикального (Рис. 60) или немного заваленного в корму (Рис. 59) заостренного штевня на высотах от палубы бака до под-

водного 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. 59, Рис. 60–6) 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. 59, Рис. 60–4), 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 от части затупленной и очень прочной частью форштевня в нижних слоях ледового поля (Рис. 59, Рис. 60–4), где лед разогрет до температуры воды, а заостренный форштевень в надводной части (Рис. 59, Рис. 60–3) 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. 59) для гидродинамической компенсации возможного зарывания носовой части корпуса под гребни встречных волн при движении корабля на большой скорости хода, или же иметь завал верхней ча-

сти шпангоутных контуров и заниженную высоту до точки сопряжения с ширстречным поясом верхней палубы тихоходных судов (Рис. 60), 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. 59, Рис. 60–4) бортовая обшивка в диапазоне переменных ватерлиний образует винтообразную поверхность (Рис. 59, Рис. 60–5) 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 формированием булей и завала борта на уровне действующей ватерлинии в средней части корпуса (Рис. 59, Рис. 60–7), 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.

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 сопряженной зоне ударных ледовых нагрузок.

Кормовая оконечность стабилизированного для штормового плавания корабля – «Ахтерштевень и кормовой подзор корабля»

Патент № RU-2607635.

Ахтерштевень и кормовой подзор стабилизированного для штормового плавания корабля устраиваются в одно- или в двухвинтовых вариантах установки движителей, с возможностью использования крыльевых стабилизаторов остаточной бортовой и килевой качки, и отличаются:

- устройством двух винтовых поверхностей для гидродинамической стабилизацией ходового дифферента на тихой воде и в условиях интенсивного штормового волнения: первая на уровне переменных ватерлиний с протяженностью от завала шпангоутов на бортовых булях до заостренной кормовой раковины крейсерской кормы; и второй винтовой поверхности – опирающейся на килевую линию и закручиванием потока воды в противоположную сторону, из под днища вверх в зону винто-рулевого комплекса;
- склоновые обводы при сопряжении этих винтовых поверхностей создают условия взаимокомпенсации вихревых потоков под кормовым подзором, что требуется для общей стабилизации поступательного течения и гашения внешних волновых возмущений в зоне действия рулей и стабилизаторов качки;
- при этом, осредненный вектор скоростей течений вблизи бортовой обшивки определяется восходящим потоком воды из под корпуса, пересиливающим вихревое закручивание от днищевой винтовой поверхности, что важно для предохранения винто-рулевого комплекса от ударов крупных ледовых обломков на поверхности воды, и способствует поддержанию ледового канала за кормой корабля.

Ахтерштевень и кормовой подзор корабля построены с учётом особенностей судовождения в сложных, штормовых и ледовых условиях

мореплавания, и представляется результатом математических и экспериментальных исследований в области целевого непротиворечивого проектирования корабля для штормовых и ледовых условий мореходства на Дальнем востоке России, в полярных акваториях Арктики и Антарктики.

Ахтерштевень, кормовая скула, раковина и подзор винто-рулевого комплекса водоизмещающего корабля устраиваются в одно- или в двухвинтовых вариантах движителей с возможностью установки стабилизаторов килевой и бортовой качки в ускоренных потоках непосредственно за гребными винтами (Рис. 61, Рис. 62). С этой целью создан и экспериментально проверен 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;
- заостренная крма 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.

Комплекс перечисленных технических решений в целом способствует лучшей ходкости и малой качке в условиях интенсивного штормового волнения, предотвращает набрызговое обледенение верхних палуб и обуславливает возможность автономного плавания во льдах средней тяжести.

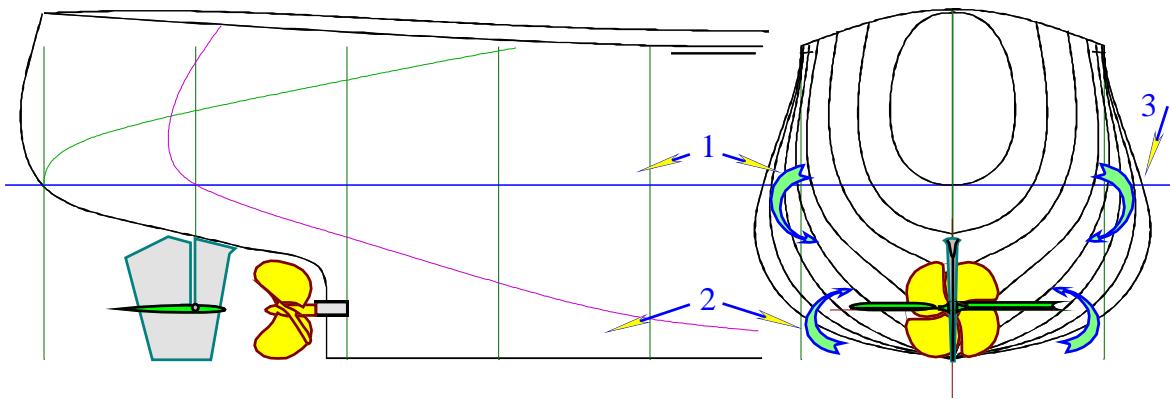


Рис. 61. Кормовая скула, подзор, раковина и ахтерштевень одновинтового корабля, оптимизированные по условиям минимизации ходового дифферента, корабельного волнобразования и, как следствие, ожидаемого уменьшения силового воздействия на корабль со стороны штормового волнения за счет пропуска штормовых 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.

В технических решениях выделяются варианты для одновинтовой (Рис. 61) и двухвальной (Рис. 62) 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 волнобразования 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 пере-

хватывает приподнятые гребнем корабельной волны ледовые поля и не допускает их затопление и затягивание в район винто-рулевого комплекса в кормовой части корпуса.

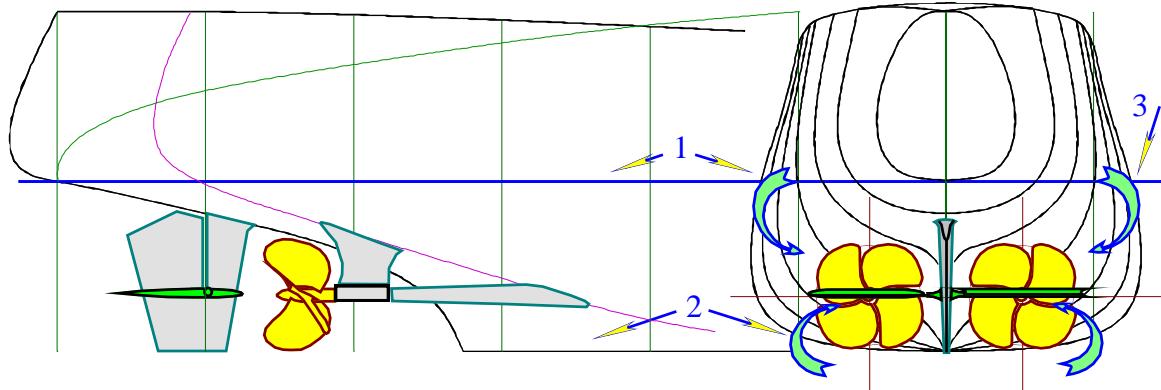


Рис. 62. Кормовая скула, подзор, раковина и ахтерштевень двухвинтового корабля, оптимизированные по условиям минимизации ходового дифферента, корабельного волнобразования и, как следствие, ожидаемого уменьшения силового воздействия на корабль со стороны штормового волнения за счет пропуска штормовых 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.

Инженерно-технические проектные решения.

Оптимизация обводов сводится к поиску геометрических форм для пропуска штормовой трохоидальной волны через корпус корабля с минимальными искажениями. Вычислительные эксперименты и мореходные испытания по моделированию корабельного волнобразования и воздействия на корпус трохоидальных штормовых волн [61] подтверждают, что основное влияние на штормовую мореходность корабля оказывает

зывает форма носовой части корпуса, в то время как по обводам кормовой оконечности возможны частные и существенно противоречивые проектные заключения, особенно если оптимизационный функционал определяется для учета какого-либо одного из частных режимов практической эксплуатации судна.

Настоящим изобретением определяется единых и унифицированный комплекс инженерно-технических решений, определенных по результатам математической оптимизации, но в большей степени опирающихся на последующую доработку и экспериментальное опробование кормовых обводов для достижения наилучшей ходкости и стабилизации качки на штормовом волнении, оптимизируемых в комплексе с достижением устойчивой работы винто-рулевого и стабилизационного комплекса под кормовым подзором корабля.

Корпус судна оптимизируется преимущественно для автономного плавания в условиях интенсивного волнения под ураганными ветрами открытого океана [20, 61], с частичным учетом возможности и безопасности автономного хода судна во льдах (класс УЛ или УЛА) средней сплоченности, до 8-9 баллов, в том числе со скоростью шесть и более узлов под проводкой ледокола.

Прототипом настоящего инженерного решения следует полагать изобретение RU-2384456 – «Корабль гидрографической и патрульной службы» [42], в котором определяется назначение и эксплуатационные особенности корабля повышенной штормовой мореходности, учитывающего возможности использования Патента RU-2384457 – «Активный стабилизатор кильевой и бортовой качки корабля – штормовой аварийный двигатель» [39] с усовершенствованием в плане создания стабилизированного потока под кормовым подзором корабля и без опасности ударов от подвспылающих обломков ледовых полей. Аналогом для варианта тихоходного судна представляется изобретение RU-2535382 – «Рыболовное судно северных морей» [44], в котором рассматривается устройство крейсерской кормы для снижения качки на курсах с тралом по волне, а также достижение большей безопасности работы траловой команды в условиях интенсивного волнения и штормовых ветров. Историческими аналогами представляются добротные корабли и суда конца XIX – начала XX веков, не имевшие транцевой кормы по условиям под-

держания ходкости и предотвращения захвата кормовой оконечности штормовой волной (брочинга) произвольными курсами относительно интенсивного волнения и ураганных ветров на глубокой воде в океане.

Ахтерштевень и кормовой подзор корабля улучшаются для все-погодного плавания в условиях интенсивного волнения под ураганными ветрами открытого океана, с учетом необходимости автономного хода во льдах средней сплоченности.

Для достижения наилучшей ходкости и маневренности на интенсивном штормовом волнении, обеспечения возможности автономного плавания в ледовых условиях дальневосточных морей России, ахтерштевень, кормовая скула и подзор винто-рулевого комплекса водоизмещающего корабля повышенной штормовой мореходности устраиваются в одно- или в двухвинтовых вариантах установки движителей (Рис. 61, Рис. 62), в том числе с возможностью установки и использования активных стабилизаторов остаточной кильевой и бортовой качки в ускоренных потоках непосредственно за гребными винтами [20], которые при аварийной остановке главных машин автоматически начинают работать в качестве штормовых плавниковых движителей.

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.

Корабельное волнообразование, также как и воздействие штормовых волн, относится к полосе бортовой обшивки на уровнях переменных ватерлиний, омываемых под воздействием вертикальной и кильевой качки. 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 га-сящей интерференции с главной компонентой волнообразования – попе-речной корабельной волной. Такая винтовая поверхность на уровне пе-ременных ватерлиний формирует малый надводный объем и естествен-ное заострению раковины под крейсерской кормой корабля, что требу-ется 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 поте-ри хода, а также способствует сохранению слабоискаженного поля штормовых волн под кормовым подзором при остановке главных ма-шин, что автоматически переключает успокоители килевой и бортовой качки в режим штормовых аварийных движителей для удержания ко-рабля на заданном курсе под тягой жестких качающихся крыльев на упруго проворачивающихся горизонтальных балерах.

Заостренная крейсерская крма не искажает гидродинамическое поле потоков воды в штормовых волнах под кормовым подзором корпу-са при остановке главных машин, что автоматически переключает ак-тивные 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 ко-мовой оконечности должны оптимизироваться для поддержания управ-ляемости даже при той минимальной тяге, которая возникает при верти-кальных 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 встречное за-кручивание существенно большего поддерживающего потока, что поз-воляет обеспечить взаимокомпенсацию нижнего и верхнего, идущего на уровне переменных ватерлиний, завихренных потоков в зоне кормового подзора, в области действия руля и горизонтальных успокоителей оста-точной (нелинейной) килевой и бортовой качки корабля. Оба потока со-здают 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 С2

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 сцепке, 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 поверхности машущего крыла, при этом, для приведения в движение цепной линии плавника строго по синусоидальному закону, применимы различные механизмы на основе коленчатого вала, гибкой шарнирной плети или линейных шаговых электродвигателей.

Плавниковый движитель корабля устроен в виде последовательности гибких полосовых поверхностей с жесткими ребрами, выполняющими вертикальные перемещения в цепной сцепке, задающей углы наклона каждого из жестких ребер по касательной к бегущей синусоиде.

Движитель (Рис. 63) 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.

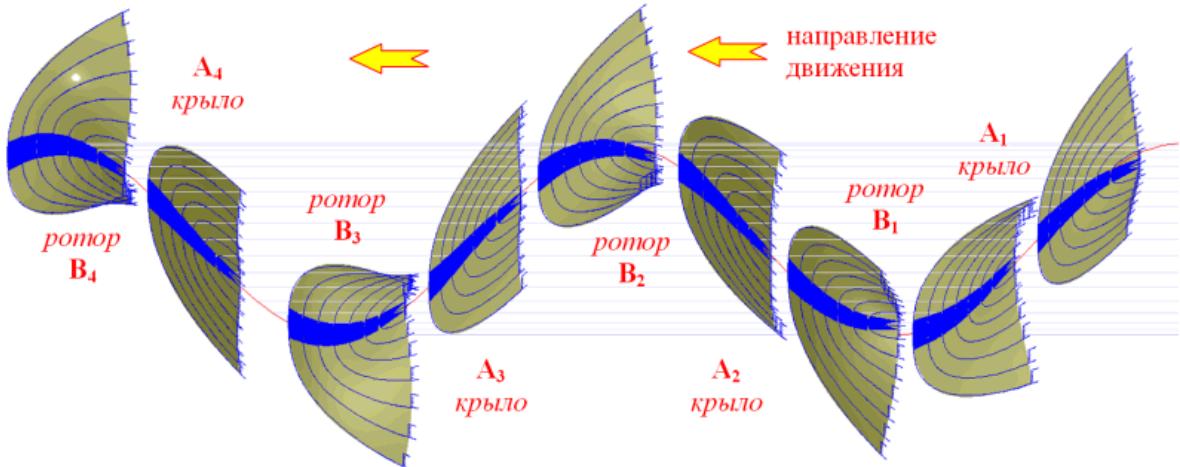


Рис. 63. Кинематическая последовательность вертикальных перемещений и сопутствующее изменение формы машущей поверхности симметричного гибкого плавникового движителя (справа–налево), при его движении по синусоидальной траектории в диаметральной плоскости за корпусом судна. В позиции: А – плавник работает 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 индуктив-

ные 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 «*B-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 «*A-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 позволяют использовать плавниковый движитель в качестве рулевого устройства и успокоителя качки одновременно.

При реализации механических приводов по схемам 1-3 плавник естественным образом будет работать в качестве пассивного движителя, использующего энергию вертикальной качки корпуса корабля на морском волнении. При реализации движителя по схеме 3, для включения его в работу в пассивном режиме можно предусмотреть соответствующие блокировки цепной линии для перевода его в режим движения по синусоидальной траектории по схемам 1-3.

Испытание натурной модели корабля (Рис. 52) 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-С2.

Минимизация внешних воздействий, построенная на принципах взаимного снижения восстанавливающих и возмущающих сил и моментов, как это часто и бывает в сложной технике, приводит к усилиению негативных проявлений воздействий другой или второстепенной природы, 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 управляемой энергией для компенсации всех изначально неучтенных и «незначительных» внешних сил.

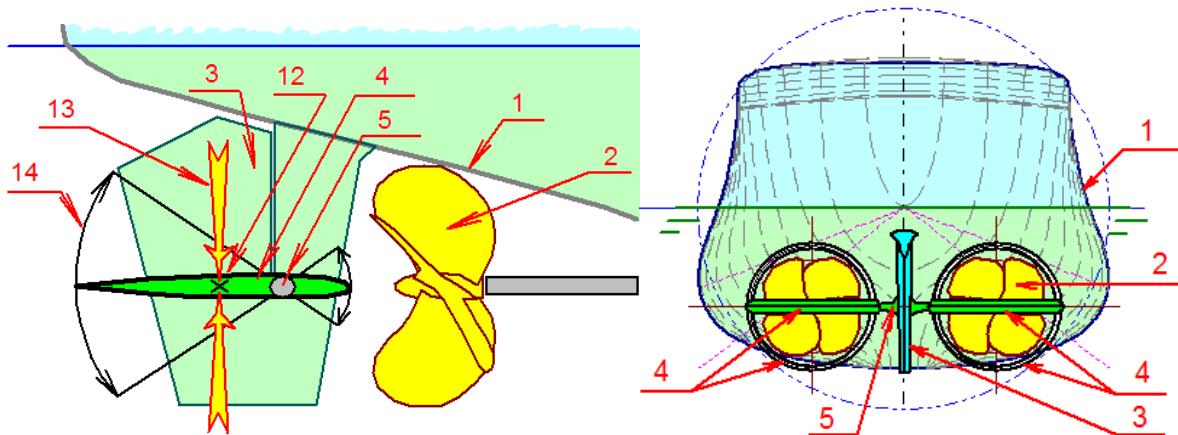


Рис. 64. Винторулевой комплекс с вертикальным рулем (3) и горизонтальными крыльями активных успокоителей килевой и бортовой качки (4), которые в случае остановки гребных винтов (2) работают в качестве аварийных штурмовых движителей. 1 – оптимизированный корпус корабля; 4 – крыло может быть жестко соединено с поворотными насадками; 5 – горизонтальный баллер установлен строго на линии балансирной оси для потока за гребным винтом и допускает упругий поворот на угол порядка $\pm 30^\circ$; 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 – штурмовой аварийный движитель (Рис. 64) 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 $\pm 30^\circ$, обеспечиваемый пружинным (или электромагнитным) устройством с восстанавливающим моментом пропорциональным отклонению крыла от нейтрального нулевого, или заданного аппаратуруй 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 крениющие 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 перемещениями 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.

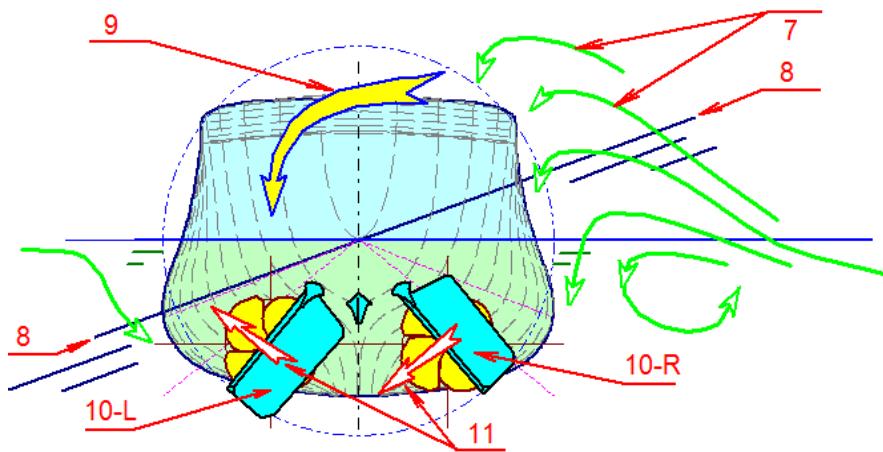


Рис. 65. Силовое воздействие гребней штормовых волн (7); условно наклонная поверхность штормового моря вблизи корпуса корабля (8), и образующийся под их суммарным воздействием кренящий момент (9). Поворот правого крыла (10-R) на погружение на затопленном волной борту, где образовалась избыточная плавучесть, 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 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. 64). Именно здесь возможно получение наибольших сил для активной стабилизации крена и дифферента корабля как в штормовую погоду, так и при быстрой циркуляции на тихой воде.

В случае потери хода кормовая часть корпуса получает значительные вертикальные колебания под воздействием штормовых волн, что обуславливается 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 $\pm 30^\circ$ 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. 64) 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. 65) 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» [39]), 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.

Глава 3. Проектные решения для дальневосточных кораблей и судов повышенной мореходности

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 положения непротиворечивого проектирования корабля, устанавливающие механику сложенного диалога корабля со штормовым морем в конкретных навигационных условиях, в хорошей морской практике связываются аксиомой технической эстетики 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 дальневосточных океанских маршрутов, приводят к востребованности эффективной и безопасной работы палубной команды, использования судовых устройств и механизмов в любых погодных условиях, когда исходные мореходные качества и опыт штормового судовождения определяют предназначение судна, и – являются единственной гарантией безопасности для его экипажа.

Безусловно, повышенные требования относятся к образовательному и плавательному цензу экипажей судов, их опыту морской практики, на котором, в свою очередь, должны основываться ключевые проектные решения для всех новых судов, и впоследствии 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; круп-

ными 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 более 45° .

Эффективность всепогодного ведения работ на море связана с комфортностью бытовых условий для экипажа по плавности и малости штормовой качки; с уровнем защищенности палубной команды от шквалов и северных леденящих ветров; с возможностью обогрева помещений 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 практических 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 рыбакские 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 [20], сообразно условиям эксплуатации можно сформулировать обобщенные требования к мореходным качествам:

– 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 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 не существенна, что повышает требования к достаточно высокой квалификации экипажа, в борьбе за живучесть судна обязанного 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 действующей ватерлинии и заострение ее в оконечностях для уменьшения силового воздействия штормовых волн и сохранения ходкости при малой 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 раз渲а бортов и широкой непрерывной верхней палубы, что предотвратит чрезмерную качку с ударами волн по бортам и палубам и 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 общехинженерных 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 узостях, 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 очень важное, так как невозможно найти обоснованные проектные решения на основе гидродинамического согласования безопасных режимов плавания в штормовых условиях мелководья. Это означает, что каждый проект существующих или перспективных судов должен проходить комплекс мореходных испытаний с управляемыми опытными моделями 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.

Полагаясь на избыточную энергооруженность, судно обретает технические возможности и гидродинамический напор движителей для активного маневрирования на штормовом курсе или для своевременного уклонения от встреч с тайфунами, если при этом забывается необходимость выполнения рейсовых заданий и на пути непредсказуемого дрейфа в столь активном штормовом «простое» не окажутся прибрежные скалы и другие навигационные опасности.

Суда повышенной штормовой мореходности, способные к маневрированию произвольными штормовыми ходами и курсами при номинальной (или минимальной) энергооруженности, 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.

Универсальное транспортное судно

Патент № RU-260 3709-С1.

Самой первой практической трансформацией оригинальных обводов модели МИДВ стал проект универсального транспортного судна, созданный непосредственно в процессе анализа результатов сравнительных мореходных испытаний.

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 для многоцелевого универсального транспортного судна, допускающего различные варианты грузообработки (Рис. 66), 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 борту пассажиров, размещаемых в каютах носового отсека корпуса или в кормовой надстройке.

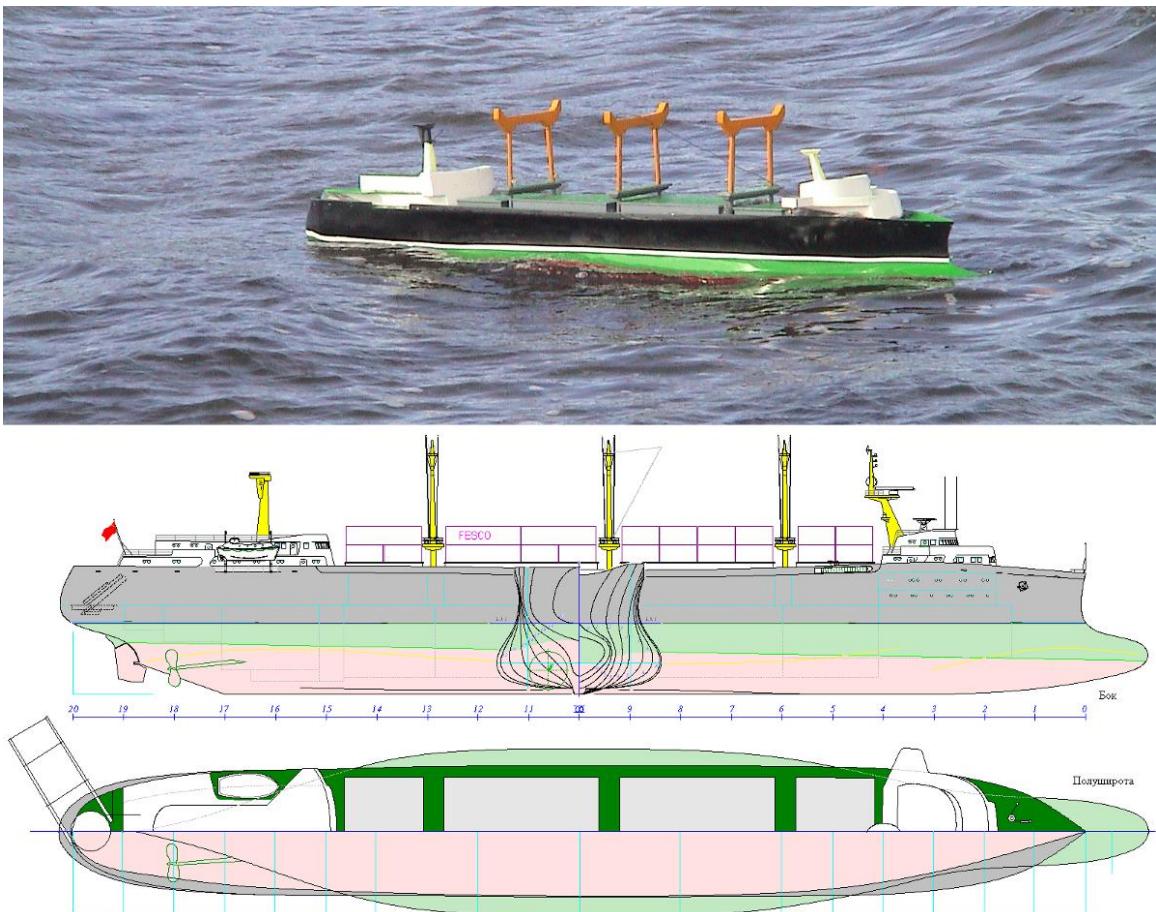


Рис. 66. Универсальное многоцелевое транспортное судно повышенной штормовой мореходности (подобно старинной галерее), и принимающее до 560 стандартных 20-футовых контейнеров, и допускающее горизонтальную обработку грузов. $L_{MAX} = 171,6$ м; $L_{KWL} = 160$ м; $B_{MAX} = 26$ м; $B_{KWL} = 20$ м; $B_{Deck} = 20,5$ м; $T = 10$ м (с килем = 11 м); $\delta = 0,716$; $W = 25\ 168\ m^3$; $S = 5\ 343\ m^2$. Судно способно держаться на штормовом курсе при маломощных двигателях, относительная тяга которых соответствует древним веслам-плавникам.

Как транспортное судно для генеральных грузов новый проект не нарушает традиционных канонов общекорабельной архитектуры, в нем сохранены основные функциональные возможности современного универсального судна. Для достижения хорошей штормовой ходкости, при малой качке корпуса, достаточно лишь пожертвовать свободными объемами бортовых надводных твиндеков, а в качестве компенсации поте-

рянных объемов и сохранения большой грузоподъемности (как коэффициента общей полноты корпуса), к примеру: увеличить общую полноту корпуса с помощью объемного носового бульба.

Ближайшим историческим прототипом транспортного судна становится древняя галера с носовым тараном и нависающим над водой ютом и кормовым подзором. Ассиметричные относительно мидель-шпангоута обводы служат стабилизации качки в носовой части корпуса и таким образом способствуют 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.

Подобная пассивная штормовая стабилизация корпуса представляется важным достоинством тяжелого транспортного судна (Рис. 66), обычно не обладающего избыточной мощностью двигателей, и не имеющего достаточной прочности корпуса для активного противостояния штормовой стихии.

Дополнительно, в соответствии с патентами России [3, 4] борт судна заваливается в средней части корпуса на уровне действующей ватерлинии для уменьшения силового воздействия штормовых волн. Для восстановления рабочей ширины палубы шпангоутным контурам в надводной части корпуса придается обратная кривизна, это обеспечивает возможность эксплуатации судна с метацентрической высотой близкой к нулю, отчего значительно возрастает собственный период бортовой качки судна, что крайне важно во избежание как резонансного, так и вынужденного силового воздействия штормовых волн, всегда имеющих меньшие видимые периоды даже в открытом океане.

Гидростатические расчеты по теоретическому чертежу (Рис. 67, 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.

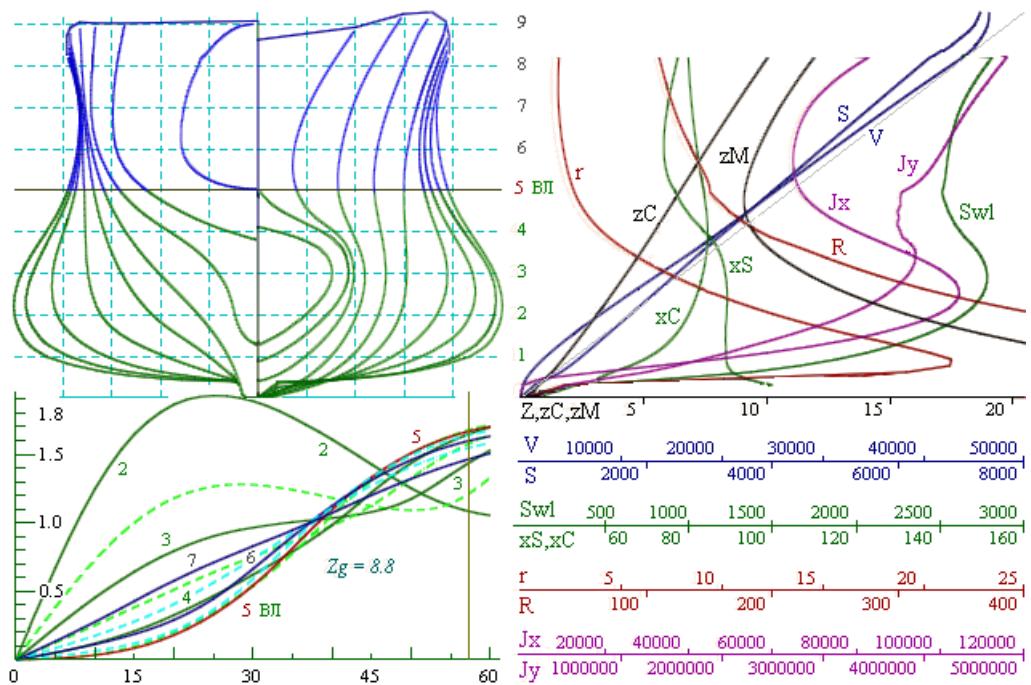


Рис. 67. Кривые элементов теоретического чертежа (справа) и диаграммы статической остойчивости при фиксированном положении центра тяжести на аппликате $Zg = Zm$ на конструктивной осадке (слева внизу) для универсального многоцелевого транспортного судна (слева вверху).

Кривые плеч статической остойчивости (Рис. 67, слева внизу) построены для ватерлиний от № 2 до № 7 при фиксированной аппликате центра масс, приведенной к метацентру: $Zg = Zm$ на конструктивной осадке WL № 5. Отчетливо видно, что даже 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 дополнитель но обретает положительную начальную остойчивость, оберегая тем самым судно от непредсказуемо избыточного крена при параметрическом резонансе в условиях усиления вертикальной качки. Еще раз отметим, что своеобразное 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. 66), 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. 67, 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 корпуса, где не особо удобно перемещать вдоль корпуса и крепить по штормовому генераль-ные 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.

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. 67). 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.

Таблица 2.

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

Удифферентовка и контроль остойчивости грузового судна зависит исключительно 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 в полном грузу, требуют особо тщательной центровки судна с предварительным планированием последовательности грузовых операций в портах назначения, и особо в промежуточных пунктах частичной грузообработки. По диаграмме остойчивости (Рис. 67) следует обратить внимание, что даже при нулевой начальной остойчивости, судно будет обладать положительным запасом остойчивости даже в случае непредвиденных накренений до углов погружения палубы (более 45°), что может служить единственным предупреждением об ошибках в проведении грузовых операций

Площадь действующей ватерлинии в кормовой части судна несколько 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 крма может иметь значительно меньшую полноту).

Варианты рыболовных траулеров

Патент № RU-253 5382.

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;
- 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 вос требованным судоводительский опыт хорошей морской практики при выполнении сложных морских промысловых операций. Это обуславливает важность участия в проектировании новых судов авторитетных 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 опытных экспериментов в открытом море и на прибрежном мелководье.

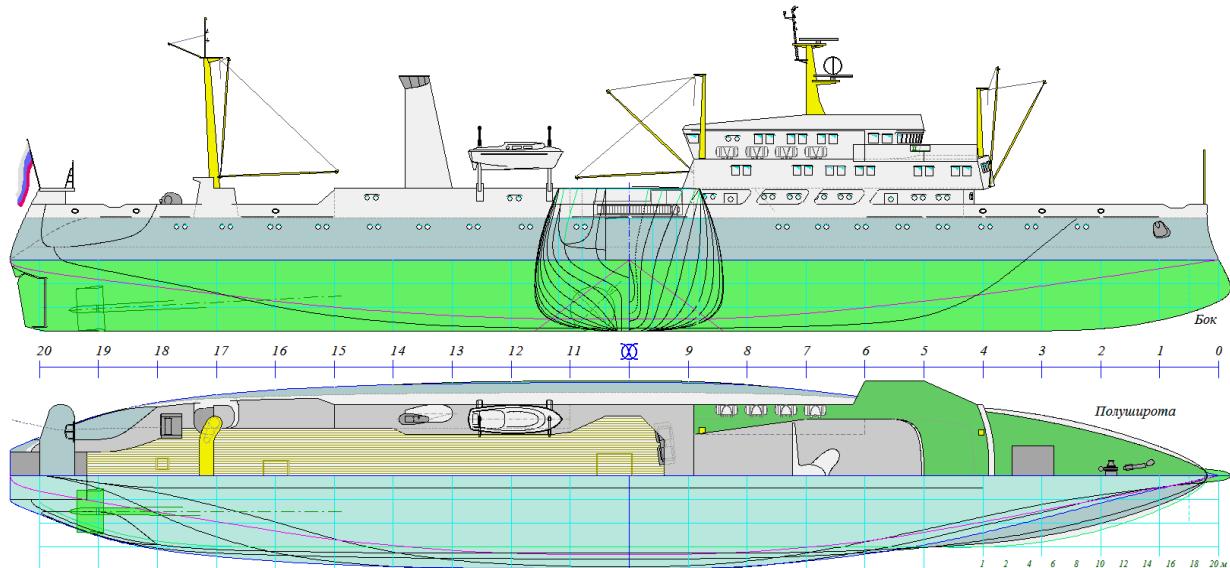


Рис. 68. Рыболовный траулер, скомпонованный по прототипу РТМС «Прометей» (суператлантик), имеющий традиционные соотношения главных размерений, форму корпуса и общеархитектурные особенности исторического корабля конца XIX – начала XX веков. $L = 100 \text{ м}$; $B = 16 \text{ м}$; $T = 6 \text{ м}$; $W = 4\ 500 \text{ м}^3$; $S = 1\ 500 \text{ м}^2$; $\delta = 0,55$ (W – водоизмещение; S – смоченная поверхность; δ – коэффициент общей полноты)

Добротным прототипом перспективного рыболовного траулера повышенной мореходности может быть традиционный суператлантик [24], скомпонованный в корпусе аналогичного по водоизмещению исторического корабля XIX века (Рис. 68). Суператлантик способен за 24 дня

работы на промысле добывать и брать на борт порядка 1200 тонн рыбопродукции.

Сохранение крейсерской кормы и свободно заливаемой в штормовом море палубой бака связывается небольшими 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; полностью укрывается от ветровых воздействий и заваливается внутрь для снижения бортовой качки 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 срезах под грузовыми шкентелями кормового портала и трал-мостика, с походным креплением досок в этих бортовых срезах в непосредственной близости от ваерных лебедок.

3. Судовые обводы обеспечивают стабилизацию кормовой части корпуса на ходу вперед, при букировке и постановке/выборке орудий лова в условиях интенсивного волнения. Кормовая часть корпуса 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 также проявляется интенсивной забортной динамикой гребней волн, которые в бортовых срезах отчасти компенсируют бортовую качку.

С ходового мостика обеспечивается обзор траловой палубы, что важно для контроля безопасности траловой команды в штормовом маневрировании судна. Непрерывная верхняя палуба позволяет тралмаст-

ру 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.

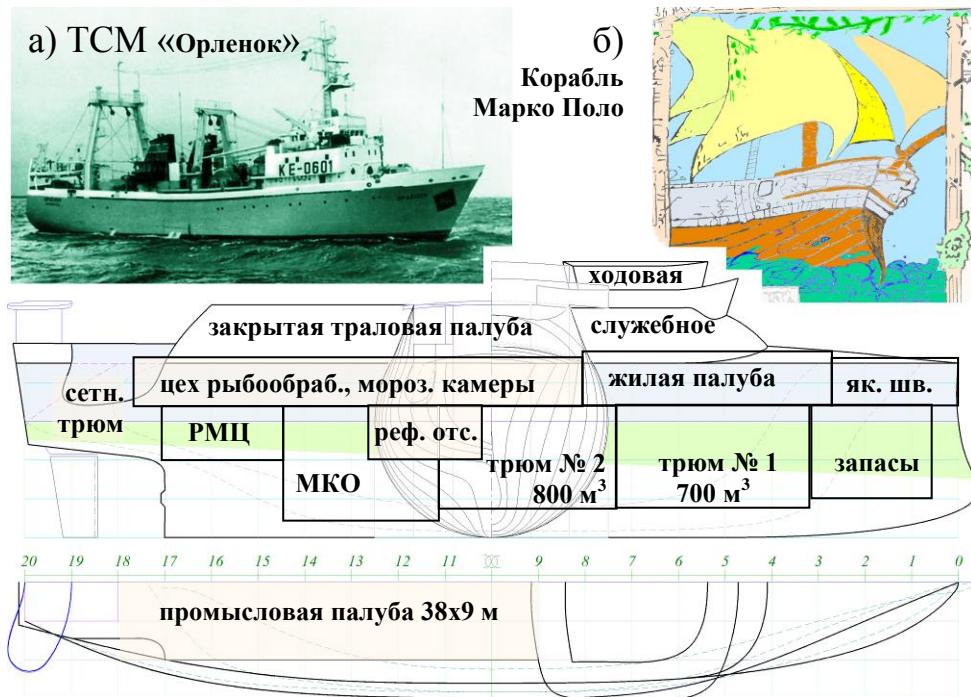


Рис. 69. Траулер-сейнер морозильный с рыбопромысловым оснащением по прототипу Атлантик-333 («Орленок»), скомпонованный в корпусе древнего китайского корабля, изображенного Марко Поло в XIII веке. $L = 60\text{ м}$; $B = 15\text{ м}$; $T = 7,5\text{ м}$; $W = 3444\text{ м}^3$; $S = 1\ 500\text{ м}^2$; $\delta = 0,55$. (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

В мореходных испытаниях телеуправляемая модель траулера подтверждала удовлетворительные мореходные качества исторического корабля [61], однако специально оптимизированные для штормового плавания опытные модели показывали несколько лучшие результаты по ходкости, плавности и малости углов бортовой и килевой качки. Включение указанного резерва мореходных качеств вполне согласуется с

необходимостью достижения лучших эксплуатационных показателей рыбопромыслового судна.

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; $W = 2400 \text{ м}^3$ (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.

Якорно-швартовные устройства размещаются в закрытом помещении форпика (Рис. 69), 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 [41]. В процессе суперпозиции встречных штормовых и соразмерных корабельных волн силовое воздействие концентрируется в районе склоновых обводов, где дифферентующие моменты выражаются 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 (Рис. 52) 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.

В мореходных испытаниях ставился также вопрос об уменьшении потенциально опасных последствий вертикальной качки⁴, которая на больших скоростях хода сопровождается заливаемостью носовой палубы и почти полным всплытием корпуса между гребнями волн. Для предсказуемой реакции траулера на управляющие воздействия руля и успокоителей качки необходимо точное знание, по крайней мере, характеристики остойчивости корпуса в любой момент времени. Использование округлых шпангоутов позволяет сохранять величину метацентрической высоты [43] 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 неуправляемого 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 [39], то их эффективность будет сохраняться при рыбопромысловых операциях с тралом или другими зaborтными 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 м³.

⁴ 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.

Возможно построение аналогичного варианта среднего траулера (**Рис. 70**), 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 м³ (781 т); трюм 200 м³ (100 т) с охлаждением до –7 °C; экипаж – 22 чел.

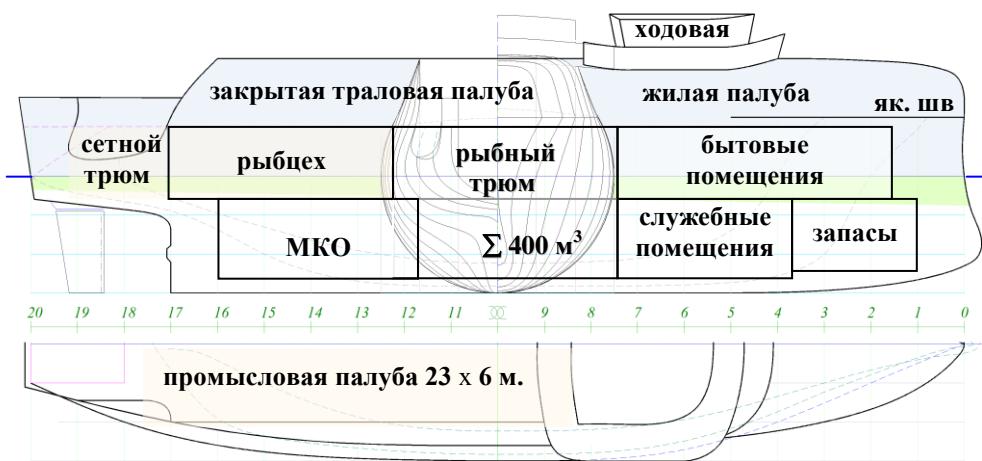


Рис. 70. Обобщенная схема размещения сейнера-траулера повышенной штормовой мореходности. L = 40 м; B = 10 м; T = 5 м; W = 1020 м³

В современных условиях на Дальнем Востоке России сложно организуется экспедиционный лов рыбы при поддержке крупных рыбообрабатывающих баз. 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. 69**). Основное отличие в отсутствии яруса шельтердека (**Рис. 70**), 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 предотвра-

щения обледенения, сохранения остойчивости и минимизации бортовой качки в условиях сильной штормовой заливаемости носовой оконечности корпуса.

Округлые шпангоуты служат сохранению одинаковой остойчивости при различных посадках корпуса в условиях вертикальной качки [43], что важно для управляемой стабилизации корпуса в штормовых условиях с целью прогнозируемого контроля качки и обеспечения безопасности палубных работ и промысловых операций при различных загрузках траулера. Узкая крейсерская крма минимизирует внешние нагрузки на ходу по волне или при выборке трала. Для работы с траловыми досками в кормовой раковине устроены бортовые срезы. Траловый слип имеет перекрытие для перестройки рыбопромысловой схемы на работу с неводами.

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.

Мореходные качества рыболовного судна лежат в основе его эффективности на промысле в открытом море. Но все же для достижения требуемого режима хода судоводитель обладает определенной свободой в выборе курса и тяги на главных двигателях (с тралом по волне), что также допускает заметное разнообразие в обводах и принципах построения общекорабельной архитектуры рыболовного судна. Рассмотрим вариант судна, в проектном задании для которого оговаривается возможность уверенного маневрирования и устойчивого движения произвольным курсом относительно штормового волнения.

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 интенсив-

ном морском волнении, а также устройство высоких палубных надстроек, в которых должны располагаться комфортабельные жилые помещения.

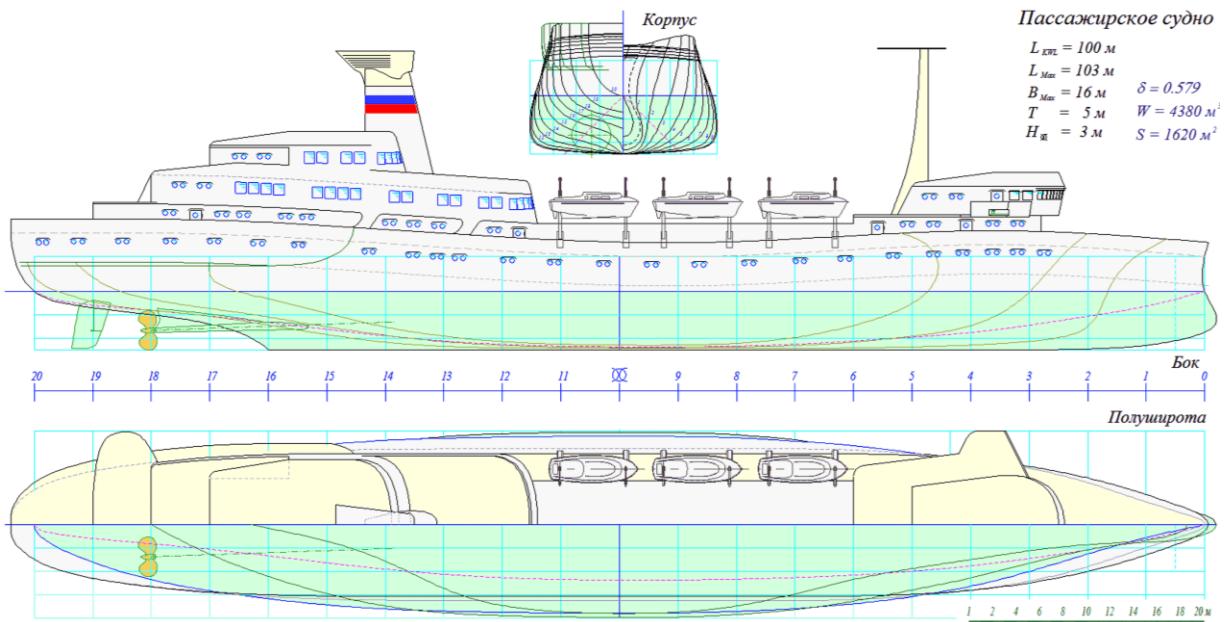


Рис. 71. Гипотетический проект каботажного пассажирского судна со схематичной прорисовкой общего расположения. Форма корпуса и надстроек выбраны с учетом необходимости снижения силового взаимодействия со штормовым волнением и обеспечивают пассивное штормование на курсе носом на волну при остановленных двигателях.

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.

Близкими по мореходности историческими прототипами являются испанские галионы или средневековые каравеллы с высокой кормовой надстройкой и заниженным баком, не обладающим свойством всхожести на волну и не противостоящим заливаемости носовой палубы.

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 _m 20 узл.
... экономичная, штормовая ($F_n=0,15$) –	V _e 9,1 узл.

Обычные каюты пассажиров и экипажа, бытовые и вспомогательные помещения могут быть расположены ниже главной палубы вдоль бортов по всей длине корпуса. Переходы между водонепроницаемыми отсеками (в случае общесудовых тревог) могут быть устроены внутри непрерывной продольной надстройки на верхней палубе.

В кормовой надстройке, расположенной высоко над водой в защищенной от воздействия волн и качки кормовой части корпуса, могут быть расположены комфортабельные каюты, зоны отдыха и общественные помещения.

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 $B/T = 3.2$.

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 мо-

нолитность фронта встречной волны, частично защищая таким образом ходовую рубку и среднюю часть корпуса.

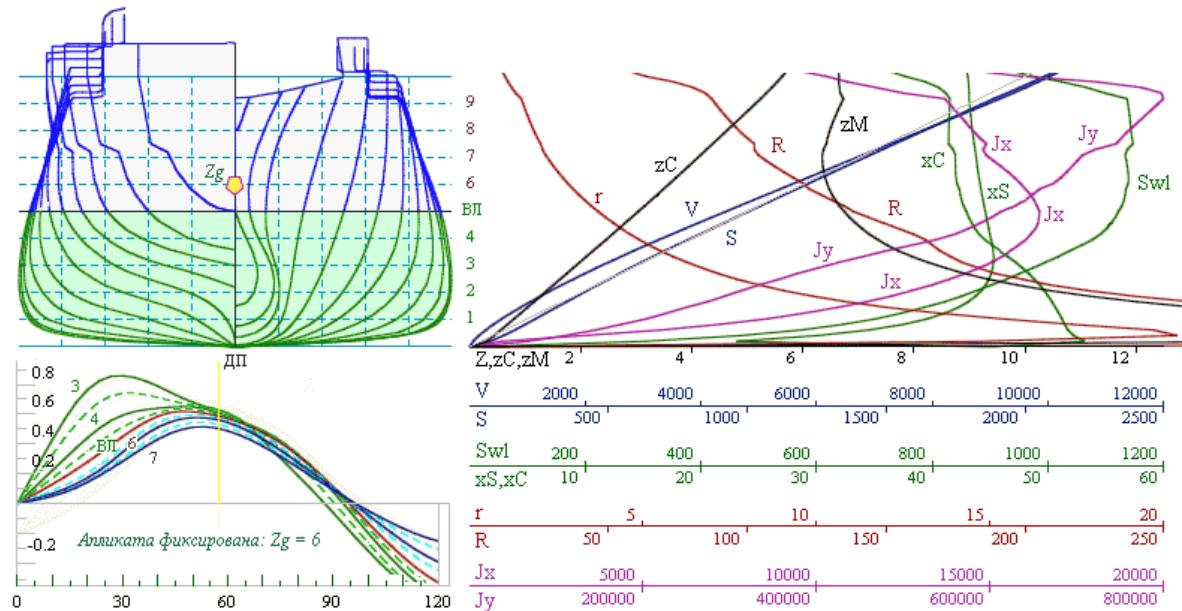


Рис. 72. Кривые элементов теоретического чертежа и плечи остойчивости ($Zg=6$ м) при различных осадках. На конструктивной осадке метацентрическая высота $h=6$ м.

Кормовая часть корпуса выполняет роль надводного «штурмового 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. 72) подтверждают удовлетворение основных требований к форме корпуса, достигаемые устройством завала надводного борта и значительным уменьшением полноты корпуса судна в оконечностях:

- на конструктивной осадке диаграмма остойчивости имеет хорошо выраженную S-образность, особенно на осадках мгновенного погружения корпуса в полуфазах вертикальной качки, что позволяет безопасно снижать остойчивость для увеличения периода бортовой качки и повышения комфортности обитания в штурмовом плавании.

- 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;

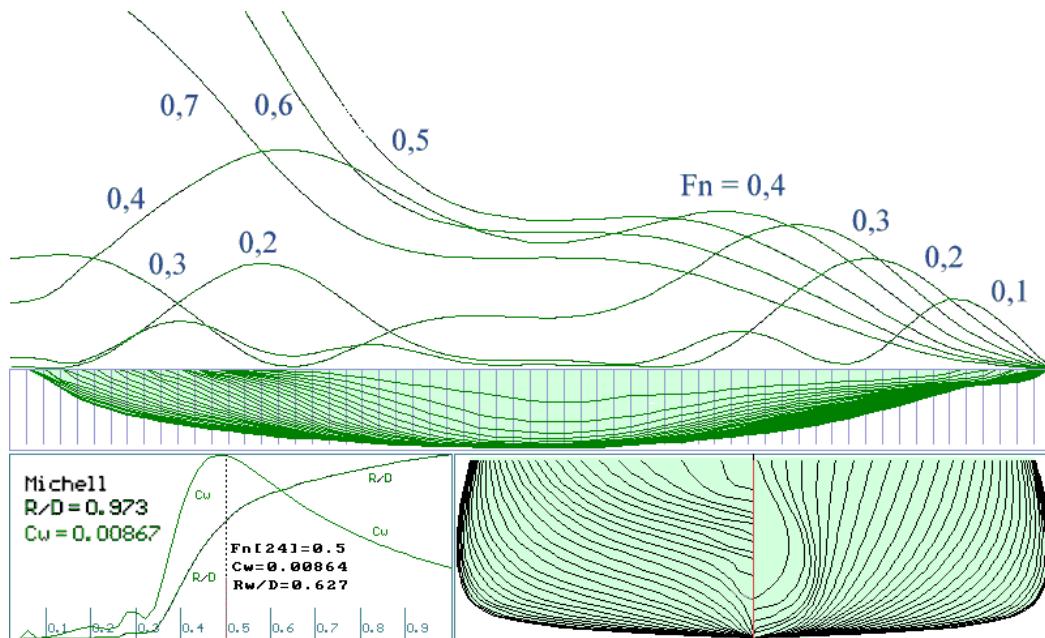


Рис. 73. Расчеты коэффициентов C_w и сил волнового сопротивления относительно водоизмещения R/D для каботажного пассажирского судна. В верхней части рисунка приведены графики интенсивности излучения корабельных волн по длине корпуса, где иллюстрируется затягивание корабельной волны под носовую склону на скоростях порядка $F_n=0,3\div0,4$ (18÷24 узл.)

Узкие заостренные ветви носовых ватерлиний служат поддержанию высокой скорости хода произвольными курсами относительно умеренного морского волнения и пологой океанской зыби, при этом в носовой части корпуса не развиваются больших кренящих или дифферентующих моментов от внешних сил волновой природы. Достижение режима безударного прорезания встречных гребней крупных штормовых волн достигается за счет малой высоты и полноты надводного борта в носовой оконечности, где высокий уровень заливаемости палубы бака предотвращает усиление бортовой и килевой качки.

Палуба бака не защищена от захлестывания высокоскоростными гребнями обрушающихся волн, поэтому необходимо устройство несколько увеличенной погиби бимсов, с достаточно упрочненным

ширстречным поясом и приподнятым фальшбортом над ватервейсами для быстрого сбрасывания воды с палубы бака за борт.

На большой скорости хода основные волновые нагрузки будут приходиться на носовую часть корпуса (**Рис. 73**), 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 же остановки главных двигателей, подобно штормовому флюгеру, пассажирское судно самостоятельно выходит 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 штормовых волн.

Каботажное судно Сахалино-Курильского края

Сахалинским морским научно-техническим комитетом представлено заключение по строительству каботажного пассажирского судна для всесезонной и всепогодной навигации на регулярных линиях Сахалино-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 гидродинамических 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 технологические ограничения Хабаровского судостроительного завода

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 x 16 x 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 каждому 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.

Общархитектурное 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-пассажирское 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 узостях на подходах к морским портам Сахалина и Курильских островов;

3. Класс судна Российского Морского Регистра судоходства: KM ® Arc4 AUT3-ICS RO-RO Passenger ship;

4. Архитектурно-конструктивный тип: судно со стальным корпусом и надстройками из морского алюминия, одновинтовое, с двухсторонним 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 корпруса	S	1 566 м ² ;
Скорость хода форсированная ($F_n=0,27$) –	V _m	14 узл.
... экономичная, номинальная ($F_n=0,22$) –	V _e	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;

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.

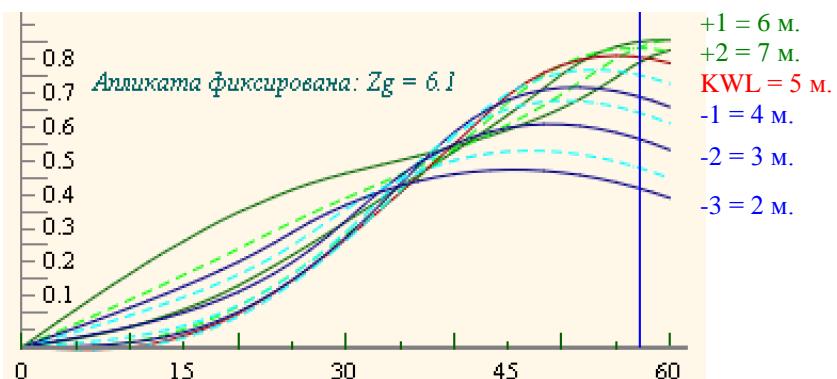


Рис. 74. Плечи статической остойчивости при фиксированном положении аппликата центра тяжести (в походном положении): $Zg=6,1$ м при различных осадках: от 2 м – в синие кривые, $KWL=5$ м – красная, и до 7 м. – зеленые.

Судно предлагается оснастить активным кормовым успокоителем килевой и ботовой качки (Рис. 61) – штормовым аварийным движителем

[39] – Патент № RU 2384457 С2, 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. 75) формы корпуса традиционно определяется коэффициент C_w , необходимый для использования совместно с расчетами вязкого трения, либо более практическая величина R/D – отношение величины сопротивления к водоизмещению корпуса.

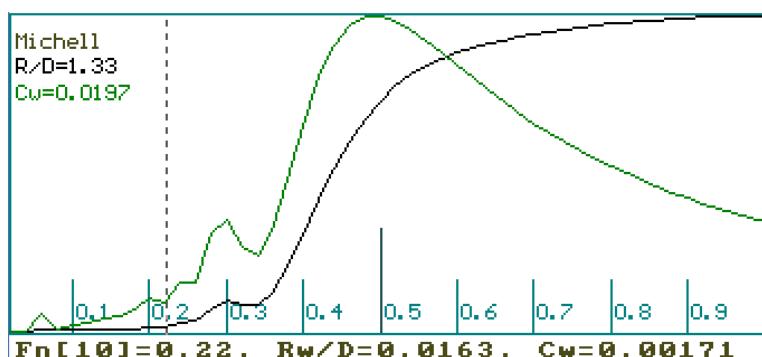


Рис. 75. Расчеты коэффициентов C_w и сил волнового сопротивления относительно водоизмещения R/D . Пунктирная вертикаль отмечает минимум корабельного волнообразования для скорости относительной хода $F_n=0,22$ (11,6 узл.).

Моделирование и анализ корабельного волнообразования необходимо для обоснованного выбора номинальной скорости хода проектируемого судна, и востребуется в предварительных экспертных оценках ин-

тенсивности силового взаимодействия корпуса корабля со свободными штормовыми волнами трохоидальной (Герстнеровской) природы.

Расчет ходкости.

Номинальная скорость судна ($F_n = 0.22 \sim 6 \text{ м/с}$) – 11,6 узлов

Форсированный или штормовой ход ($F_n = 0.27 \sim 7,2 \text{ м/с}$) – 14,0 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. 76) 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.

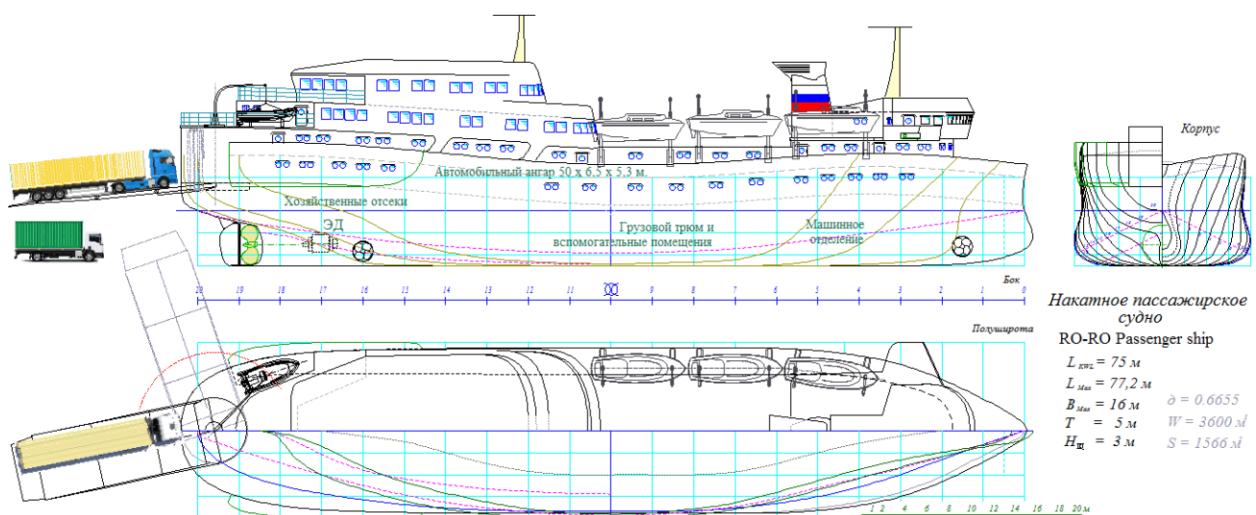


Рис. 76. Накатно-пассажирское судно.

Предельно короткий гребной вал и малогабаритность маршевого электродвигателя столь же актуальны для установки кормового подру-

ливающего устройства с максимальным смещением в кормовую оконечность судна.

Востребованность электрогенераторов повышенной мощности определяется необходимостью обслуживания кормовой забортной аппаратуры и подвальных рельсовых тельферов, задействуемых в погрузочно-разгрузочных операциях 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 спилов или десантных причалов.

Единое машинно-котельное и электрогенераторное отделение позволит объединить все энергетические ресурсы под контролем единого 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 каютаами для экипажа на баке и для пассажиров – вдоль автомобильного ангаря и в комфортабельной кормовой надстройке.

Плановая пассажировместимость 250 человек обеспечивается каютаами 1-2 класса, а также сидячими местами 3 класса в общих салонах.

Под главной палубой располагаются вспомогательные, хозяйствственные и грузовые отсеки – трюма, разделенные водонепроницаемыми переборками в соответствии с требованиями Регистра России.

8. Б. Архитектурное построение пассажирского судна

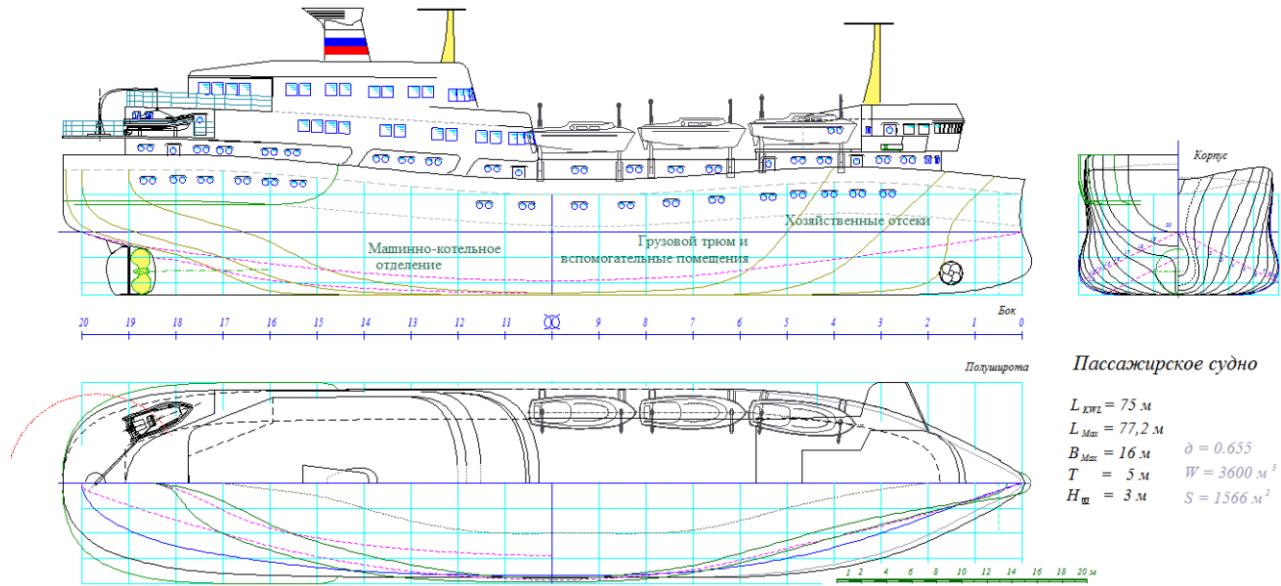


Рис. 77. Пассажирское судно.

В случае чисто пассажирского судна (Рис. 77) 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 маневрирования 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.

Океанский спасатель – научно-исследовательское судно

Патент № RU-260 3818-Cl.

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 поисковых работ

и морских исследований в сложных, ледовых и штормовых условиях плавания.

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 состоит из моряков-профессионалов, обязанных работать на верхних палубах и выполнять спасательные операции или гидрографические измерения в штормовую погоду и в условиях обледенения верхних палуб, 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.

Используя в качестве прототипа исторические корабли эпохи великих географических открытий, определяем обводы корпуса по аналогии с арабской шебекой, а компоновку палубных надстроек и судовых устройств в соответствии со 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 смешены в кормовую часть, что способствует смещению в корму центров килевой качки и рыскания, приближая их к зоне действия руля и движителей;

3) зауженные и заостренные носовые ватерлинии не обеспечивают всхожести на волну, отчего центр всплытия и ось килевой качки на ходу судна смещаются в корму, ближе к средней части корпуса;

4) полная крма с высоким ютом и глубоко погруженным плавниковым ахтерштевнем обеспечивают управляемость в штормовых условиях, позволяя экипажу проводить палубные работы в кормовой части судна;

5) основная масса судна сосредоточивается в средней части корпуса, что уменьшает поперечный момент инерции массы судна и позво-

ляет использовать горизонтальные поворотные насадки [6] на движителях для успокоения килевой качки и выравнивания дифферента при позиционировании на волнении;

б) форма надводного объема носовой части корпуса приспособливается к прорезанию гребней штормовых волн в условиях повышенной заливаемости, для чего палуба бака предельно снижена, а носовая надстройка включена в контур прочного водонепроницаемого корпуса.

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 (Рис. 78), обеспеченных как пассивными качествами безопасного плавания, так и активными техническими средствами для решения поставленных задач.

Корпус 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 обладать достаточно прочным корпусом для противостояния ударным нагрузкам при встрече с гребнями девятых валов, и под-



Рис. 78. Округлый корпус и низкие палубы судна уменьшают интенсивность всех видов штормовой качки на глубокой воде

держания уверенного маневрирования в условиях интенсивного волнения под ураганными ветрами.

Спасательное судно также не нуждается в излишне высоких скоростях хода; в эксплуатационных расходах предусматривается номинальное потребление топлива для достижения максимальной автономности и дальности автономного плавания; а на борту имеется только необходимое судовое оборудование, предназначенное к регулярному использованию в соответствии с рейсовыми заданиями или плановыми экспедиционными предписаниями.



Рис. 79. Обводы и концептуальная схема общего расположения всепогодного океанского судна, способного обеспечивать эффективную работу палубной команды при активном маневрировании произвольными курсами относительно штормовых волн и ураганного ветра. $L_{MAX} = 62,8 \text{ м}$; $L_{KWL} = 60 \text{ м}$; $B_{MAX} = 10,3 \text{ м}$; $B_{KWL} = 10 \text{ м}$; $T_{Hoc} = 4 \text{ м}$; $T_{Корма} = 6 \text{ м}$; $H = 1,25 \text{ м}$; $\delta = 0,58$; $W = 1740 \text{ м}^3$; $S = 809 \text{ м}^2$; $V \approx 16 \text{ узлов}$

Основной подводный объем судна смешается в корму (**Рис. 79**), чему способствуют строительный дифферент и заостренные носовые ватерлинии со штормовым подрезом заваленного в корму форштевня. Округлый в целом корпус имеет минимальную высоту надводного борта, что важно для безопасного ведения забортных работ на верхней палубе при синхронизации верхней палубы в положении эквидистантно

поверхности волн. Обеспечение непотопляемости судна, как следствие, возможно при условии герметизации и включения в общий объем запаса плавучести всех палубных надстроек и рубок.

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.

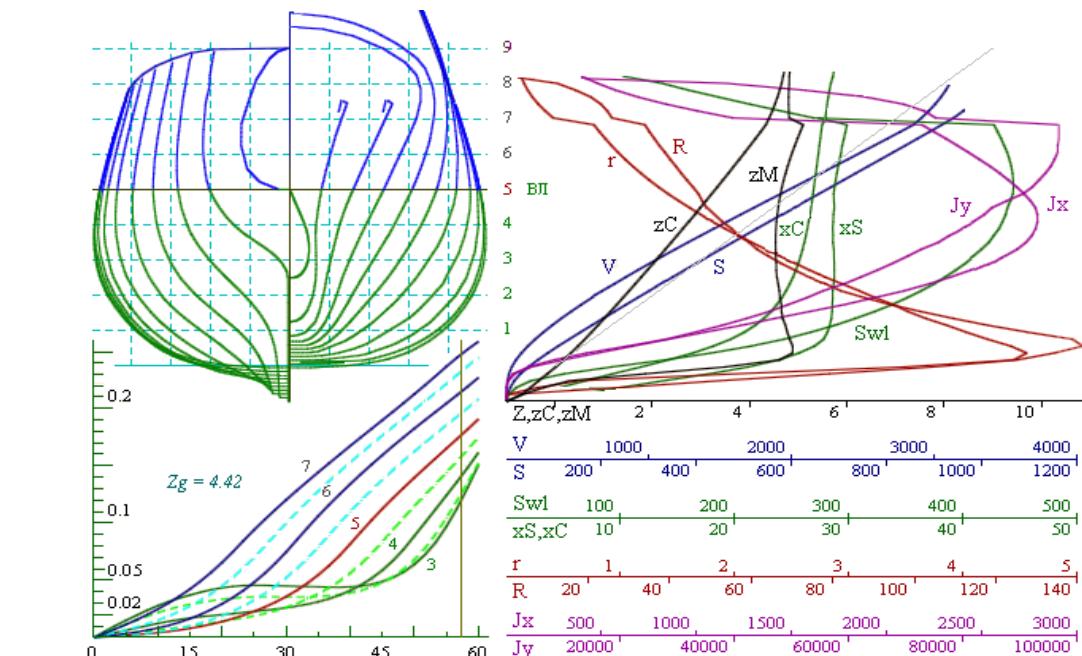


Рис. 80. Корпус морского буксира не обладает свойством умерения качки любыми средствами, ему важнее поддерживать наивысшую начальную остойчивость для синхронизации полетов палубы над поверхностью штормовых волн.

Тем не менее, запас плавучести минимизирован, а в обводах устраивается S-образность кривых остойчивости и характерный рост метацентрической высоты при погружении и всплытии корпуса в процессе его вертикальной качки,

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 телевизуальными 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, позволяющим 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.

Патрульно-гидрографический корабль (корвет).

Патент № RU-238 4456-С2⁵.

Корабль повышенной штормовой мореходности для открытого океана предназначен для непрерывного 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, гидро-

⁵ Проект разработан по заданию и под руководством кап. I ранга Сергея Ивановича Кроленко (Высший военно-морской инженерный институт, г. Санкт-Петербург).

графическую 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.

Особенностью проектной концепции является исключение скольнибудь 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.

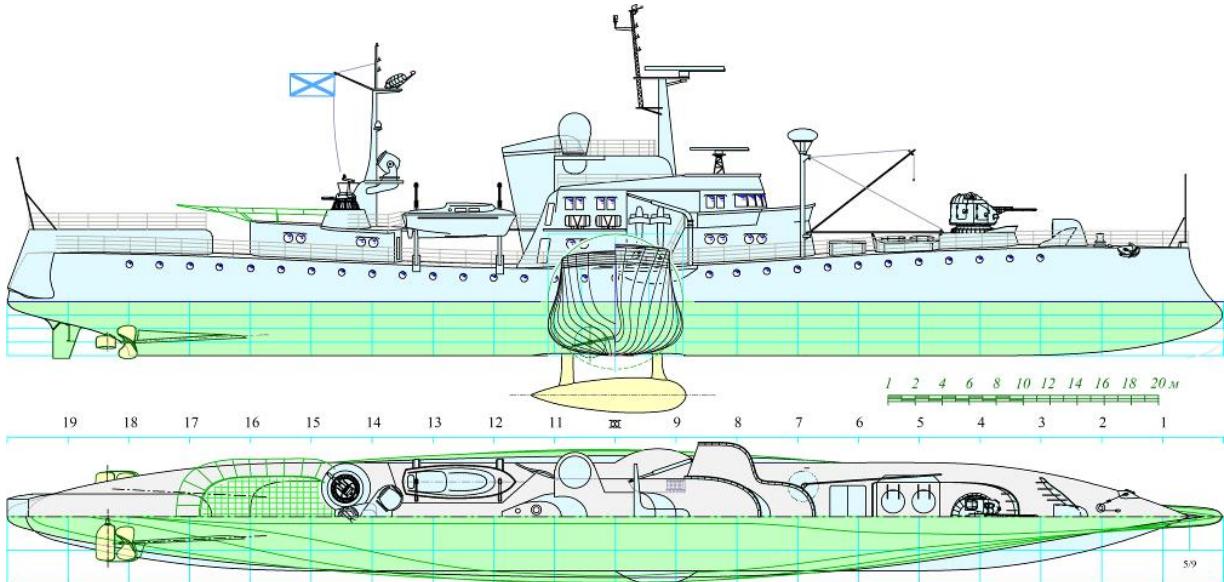


Рис. 81. Всепогодный океанский корабль, способный держать высокую скорость хода любым курсом относительно ураганного ветра и штормовых волн с минимальной бортовой и кильевой качкой, чем обеспечивается эффективное использование бортовых средств наблюдения и корабельных вооружений (*вариант с подкильной гондолой*). $L_{MAX} = 90$ м; $L_{KWL} = 88,6$ м; $B_{MAX} = 10$ м; $B_{KWL} = 9$ м; $T = 4$ м (с гондолой = 8 м, с носовым бульбом = 5 м); $\delta = 0,484$; $W = 1\ 920$ м³; $S = 1\ 050$ м²; $V = 25$ узл.

Историческими прототипами корабля выбраны эскадренные миноносцы конца XIX века, обладавшие приемлемой мореходностью в

дальних океанских походах. Форма корпуса и общекорабельная архитектура воплощают как достижения по снижению качки транспортного судна (**Рис. 66**), так и возможности поддержания штормового хода произвольным курсом океанского буксира (**Рис. 79**), отчасти улучшаемые для использования мощных двигателей. А именно: корабль лишь должен держать полный ход произвольным курсом относительно штормовых волн и ветра, обеспечивая постоянную боеготовность всех бортовых устройств и вооружений.

Ветви надводных шпангоутов в носовой части корпуса имеют небольшой развал (**Рис. 81**), что необходимо во избежание глубокого заныривания верхней палубы под гребни крупных морских волн на полном ходу корабля. Заваленный в корму форштевень под тупым углом снизу подрезает гребни встречных волн, а подводный подрез форштевня способствует свободному рысканию на косых курсах, что ослабляет удары волн о развал скулы надводного борта. Подводные ветви носовых шпангоутов создают плавно закрученную поверхность, начинающуюся от небольшого завала борта за бульбом, и направляющую набегающие потоки воды под днище корабля. Здесь также происходит затягивание вниз и гашение гребня носовой корабельной волны со стабилизацией ходового дифферента, и аналогично пропускаются под днище встречные трохоидальные волны, что трансформирует их дифферентующие воздействия в менее опасные поступательные реакции вертикальной качки.

Продольное распределение высоты борта выполнено с учетом достижения примерно одинаковой заливаемости верхней палубы в условиях интенсивного волнения моря. Все палубные конструкции сделаны в виде рубок, допускающих прием на палубу больших объемов воды, но препятствующих ее свободному перетеканию с одного борта на другой, что способствует частичному спрямлению крена под ударами штормовых волн.

Кормовой подзор короткий, и не образует висящего над водой избыточного надводного объема, что возможно при использовании двухвальной схемы винто-рулевого комплекса. Руль управления полубалансирный, расположен в диаметральной плоскости корабля. В потоке за гребными винтами установлены подпружиненные горизонтальные крылья активных успокоителей качки [5], которые при остановке главных

машин начинают работать в качестве штормовых машущих крыльевидных движителей, воспринимающих энергию вертикальных перемещений кормовой части корабля относительно поверхности воды при интенсивной килевой качке корабля без хода.

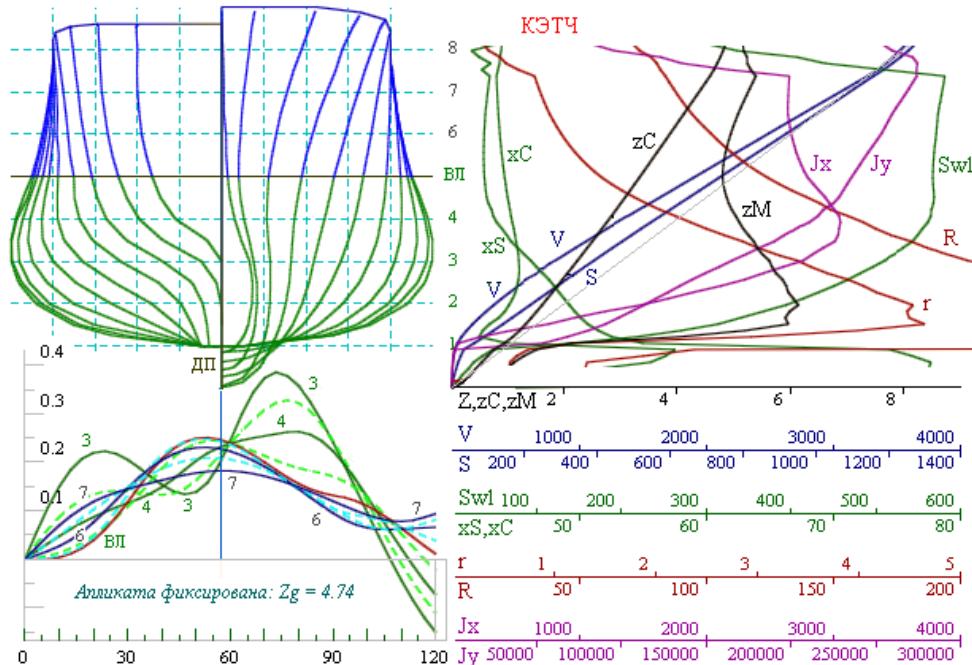


Рис. 82. Оптимизированный для штормового плавания корпус быстроходного корабля (вариант с носовым бульбом)

В средней части корпуса устраивается завал борта с точкой перегиба шпангоутных контуров на уровне действующей ватерлинии (**Рис. 82, корпус**). Диаграмма плеч статической остойчивости формы корпуса (**Рис. 82, слева внизу**) имеет ярко выраженную S-образность. При любом изменении осадки корпус обретает положительную начальную остойчивость порядка 15 см. Метацентрическая высота 10 см выводит угол заката диаграммы остойчивости к 180° даже без учета палубных рубок, что формально означает принципиальную невозможность плавания корабля кверху килем.

Для оценки поведения корабля на волнении вводится понятие полосы активных ватерлиний, которая для данного проекта составляет $\pm 1,25$ м. В этой полосе сосредотачивается силовое воздействие морских волн с высотой порядка 3–4 м. Анализ гидростатических кривых (**Рис. 82, справа**) выявляет следующие мореходные качества формы корпуса:

– на уровне действующей ватерлинии корпус имеет минимум аппликаты метацентра (zM), что придает безусловную положительную начальную остойчивость в условиях вертикальной качки;

– за счет завала бортов, при погружении корпуса уменьшается попоперечный момент инерции (Jx), и при подъеме уровня воды вблизи одного борта происходит частичное гашение гидростатического кренящего момента, в то время как на противоположном борту происходит ускоренный рост условного метацентрического радиуса (r), что отчасти компенсирует односторонний недостаток плавучести за счет увеличения плеча восстанавливающего момента. С учетом гидродинамического перераспределения давления на поверхности корпуса происходит практически полная компенсации внешних сил со стороны трохоидального волнения [3], что подтверждается экспериментами с телевизируемой моделью корабля в опытном бассейне и в открытом море.

– в зоне активных ватерлиний абсцисса центра величины (xC) изменяется несущественно, в то время как центр площади ватерлиний (xS) быстро смещается в корму (сближается с xC) при погружении корабля, и в сторону бульба/форштевня при его всплытии. В условиях интенсивного волнения корабль начинает накапливать динамический дифферент на нос, компенсирующий возможность отрыва носовой оконечности корабля от поверхности воды при прохождении полными ходами между гребнями крупных штормовых волн;

– площадь ватерлинии (Swl) в полосе активных осадок практически не изменяется, в то же время продольный момент инерции действующей ватерлинии (Jy) быстро растет при погружении корпуса за счет раз渲а бортов в оконечностях, что обеспечивает традиционное демпфирование килевой качки, и удержание палубы корабля эквидистантно осредненной поверхности волновых склонов.

На борту корабля имеются противокорабельные и зенитные вооружения; радиолокационные комплексы контроля надводной обстановки и специальные системы гидрометеорологический наблюдений. Корабельная аппаратура – для спуска на воду крупных автономных или буксируемых модулей, а также палубное гидрофизическое и гидрографическое поисковое оборудование, представленное самодвижущимися аппаратами и буксируемыми парапланами. При проведении подводных поисковых

или гидрографических работ, корабль способен образовать широкое поле гидрофизических станций, проводя контроль градиентов физических полей по значительной площади морской акватории за каждый галс.

На высоком острове ходовой рубки расположены ниши для самоходных гидрофизических модулей и параванов. Все бытовые и служебные помещения размещены внутри герметичного корпуса, верхняя палуба которого является главной водонепроницаемой палубой корабля. Вдоль правого борта проходит сквозной коридор, разделенный автоматическими дверями на водонепроницаемых переборках, а все жилые и служебные помещения располагаются по левому борту. Судовые машины и механизмы, грузовые помещения и танки для жидких грузов находятся ниже жилого яруса в корпусе корабля.

Обводы и общекорабельная архитектура корабля в целом удовлетворяют концепции целевого непротиворечивого проектирования, согласующей все инженерные решения без явных взаимно неразрешимых проблем, способных ограничить мореходность корабля в сложных, штормовых и ледовых условиях эксплуатации. Корабль соответствует основному принципу хорошей морской практики – на его борту нет ничего лишнего.

Оценка корабельных обводов и сравнительные испытания гипотетического корпуса, эталонных и перспективных моделей судов.

Современные прямые вычислительные эксперименты в гидромеханике корабля позволяют оптимизировать отдельные элементы или характеристики формы корпуса корабля, и служат планам экспериментальных изысканий для последующей поверки качества аналитических заключений в построениях формы корпуса судна. Квазистационарные математические модели идеальной жидкости также не достигают требуемого уровня обобщений по обводам и общекорабельной архитектуре проектируемых судов, оставляя востребованными старинные инженерные подходы в проектировании судна на основе капитанского опыта хорошей морской практики.

Результаты численных расчетов и авторские проектные эвристики положены в основу серии опытных мореходных испытаний самоход-

ных моделей традиционных, гипотетических и перспективных судов, в обводах которых реализованы различные принципы снижения силового воздействия штормовых волн, в том числе основанные на оценках особенностей подповерхностного плавания морских рыб, на принципах достижения штормовой мореходности известных исторических кораблей и судов, а также на результатах систематических поверочных расчетов волнообразования и удельного волнового сопротивления для различных судовых обводов с использованием интеграла Мичела.

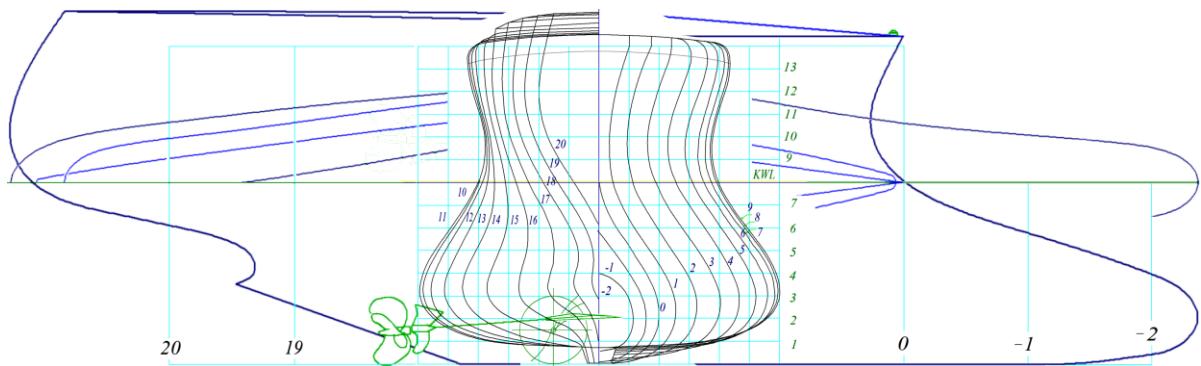


Рис. 83. Проекция «корпус» теоретического чертежа модели МИДВ. Носовой бульб заглублен, все ватерлинии предельно заострены, что сделано по необходимости поиска оптимальной посадки по условиям наилучшей ходкости на спокойной воде и интенсивном волнении.

С целью качественной оценки мореходности исторических кораблей конца XIX – начала XX веков проводилась в опытном бассейне кафедры теории корабля Ленинградского кораблестроительного института [2] в 1985-1986 гг., для чего проведены сравнительные испытания специально адаптированной к широкому диапазону посадок модели гипотетического судна (**Рис. 83**) с малыми моментами инерции площади действующей ватерлинии (МИДВ).

Среди задач ходовых и мореходных испытаний выделялась необходимость согласования ключевых положений об эволюционном развитии представлений мореплавателей о наилучшей форме корпуса и общекорабельной архитектуре корабля, и соответствующее подтверждение выводов технико-исторического анализа о превосходной мореходности исторического океанского флота.

Опытная модель МИДВ строилась по прототипам формы тела рыбы-парусника, летучей рыбы, акулы и др. (способных свободно ма-

неврировать вблизи взволнованной поверхности океана), и учитывала необходимость испытаний в широком диапазоне осадок и ходовых дифферентов, что обеспечивало варьирование размерений и завала шпангоутов в полосе действующих на штормовом волнении ватерлиний. Серия испытаний гипотетической модели удовлетворяла минимально необходимым условиям для поиска оптимальной посадки, как искомой формы корпуса с наилучшей ходкостью на всех скоростях хода (включая сверхвысоких) по спокойной воде, что требуется для последующего подтверждения тезиса об оптимальной посадке, где достигается также минимум по интенсивности качки в условиях интенсивного штормового волнения.

Изготовление и оснастка экспериментальных моделей, так же как и последующий трехмесячный цикл сравнительных мореходных испытаний проходил под непосредственным руководством профессора кафедры теории корабля Александра Николаевича Холодилина.

В обводах корпуса модели МИДВ (Рис. 83) использованы эвристики из наблюдений за морскими рыбами (парусник, летучая, акула и др., способные маневрировать вблизи взволнованной поверхности океана), а также предварительно полученные результаты систематических расчетов волнового сопротивления, сходящиеся к синтезу непротиворечивых технических решений, и, в свою очередь, к следующим геометрическим построениям:

- заострение действующей ватерлинии в оконечностях для уменьшения удельного сопротивления на скоростях хода при $F_n \leq 0,3$;
- увеличение коэффициента общей полноты корпуса за счет устройства развитого носового бульба, при сохранении заострения ватерлиний в максимально возможном диапазоне осадок от днищевых сколов до верхней палубы;
- заужение действующей ватерлинии за счет завала бортов в средней части корпуса и снижение волнообразования на скоростях хода при $F_n \geq 0,5$, придание вогнутости с последующим развалом шпангоутных контуров на уровне ширстречного пояса.

Планом опытных экспериментов ставился поиск наилучший по ходкости на тихой воде посадки корпуса от 3 до 12 ватерлиний (Рис. 83). Сохранение подобия ватерлиний в таком диапазоне осадок не позволяло устройство плавно закрученных сколовых поверхностей в оконечностях

корпуса, что несколько нарушало плавность набегающего потока в зоне перехода от носового бульба под днище корпуса, и далее – из под днища в область кормового подзора, что проявлялось излучением крутых склоновых волн, и отражалось сглаживанием минимума с повышением остаточного сопротивления на скорости хода порядка $F_n \approx 0,36$, отмечаемым как в расчетах волнового сопротивления, так и в последующих опытных испытаниях ходкости (Рис. 85) на тихой воде.

Для сопоставления с традиционными обводами транспортных судов в полный цикл сравнительных мореходных испытаний вовлекалась учебная модель быстроходного транспортного судна 60-й серии ($\delta = 0,572$), а также эталонная модель судна «Виктории» (табл. 3), использованные для сохранения возможности прямой сверки результатов экспериментов, и должного обоснования количественной оценки ходкости на тихой воде на основе стандартных серий опытных экспериментов в других опытных бассейнах.

Для первоначального выбора посадки модели МИДВ с минимальным удельным остаточным сопротивлением (*соотносимым к водоизмещению*), цикл испытаний начинался с прогонов модели по тихой воде с заданной скоростью с использованием буксировочной тележки.

Таблица 3.

Характеристики опытных моделей судов, участвующих в сравнительных испытаниях

Модель МИДВ (прототип – рыба-парусник)			60-я серия $M=1 : 70$	«Виктории» $M=1 : 45$
Длина	$L [м] =$	Max/Kwl/ $\perp\perp$: 2,6/2,32/2,2	2,1	3,012
Ширина	$B [м] =$	Max/Kwl/Deck: 0,32/0,213/0,232	0,295	0,42
Осадка	$T [м] =$	Max/ $\bigcirc\bigcirc$: 0,16/0,145	0,125	0,194
Водоизмещение	$D [кг] =$	59,4	44,3	165
Площадь поверхности $S [м^2]$ =	1,113		0,776	1,821
Коэффициент общей полноты $\delta =$	0,827		0,572	0,675

Все последующие испытания проводились в упряжке гравитационной буксировочной системы (Рис. 84), обеспечивавшей как более высокую точность измерений скорости хода на тихой воде в функции от заданного тягового усилия, так и более реалистичную оценку мореход-

ных качеств опытных моделей, получавших возможность движения с заданным тяговым усилием и переменной скоростью (вплоть до обратной) в условия интенсивного волнения.

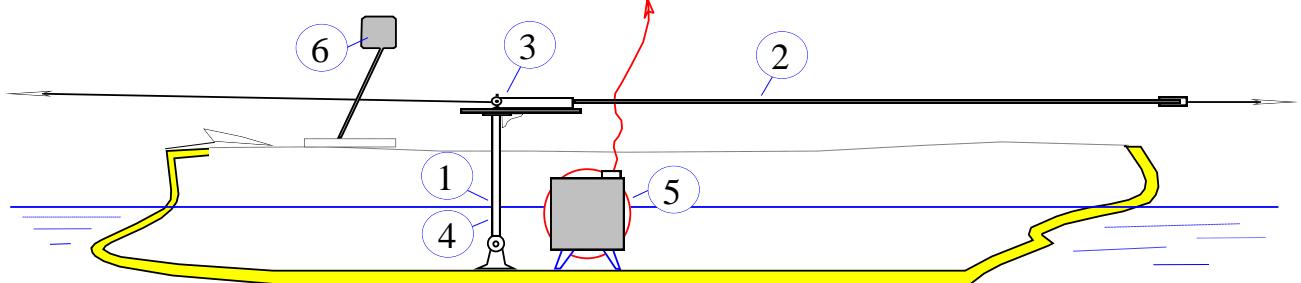


Рис. 84. Схема упряжки модели МИДВ в гравитационной системе опытового бассейна с переносом точки приложения тяги на днище модели. (1) – вертикальная штанга; (2) – горизонтальный рычаг; (3) – коромысло в центре тросового ромба; (4) – стекл на днище с поперечной осью крепления Г-образного рычага; (5) – гировертикаль; (6) – флагок для фотофиксации времени.

Для исключения добавочного дифферентующего момента, который мог быть существенным модели МИДВ с сильно заостренными ватерлиниями, точка крепления буксировочной упряжки сместилась на стекл на днище корпуса (Рис. 84), что формально соответствует аплликате точки приложения сил тяги гребных винтов.

Главной целью испытаний ходкости на тихой воде является поиск оптимальных соотношений и обводов корпуса в зависимости от посадки, при которой достигается минимум корабельного волнообразования на всех скоростях хода, включая закритически высокие, когда длина и период поперечных корабельных волн становятся соизмеримыми или превышающими штормовые волны открытого океана. Это будет соответствовать выполнению проектной гипотезы об оптимальной форме корпуса, пропускающей через себя штормовые волны без заметных искажений и, соответственно, не оказывающих чрезмерных силовых воздействий на оптимизированное таким образом судно в штормовом плавании. Заключительным результатом ожидалось существенное снижение качки при сохранении ходкости в условиях интенсивного штормового волнения.

Непосредственно перед началом испытаний ходкости на волнении для каждой модели с полным комплектом измерительного оборудования

строились буксировочные кривые сопротивления движению на тихой воде, при этом на моделях было уже смонтировано все оборудование, используемое для испытаний на волнении. Сопротивление трения эквивалентной пластины вычислялось по стандартной формуле ITTC-57:

$$C_F = \frac{0.075}{(\log_{10} Rn - 2)^2}.$$

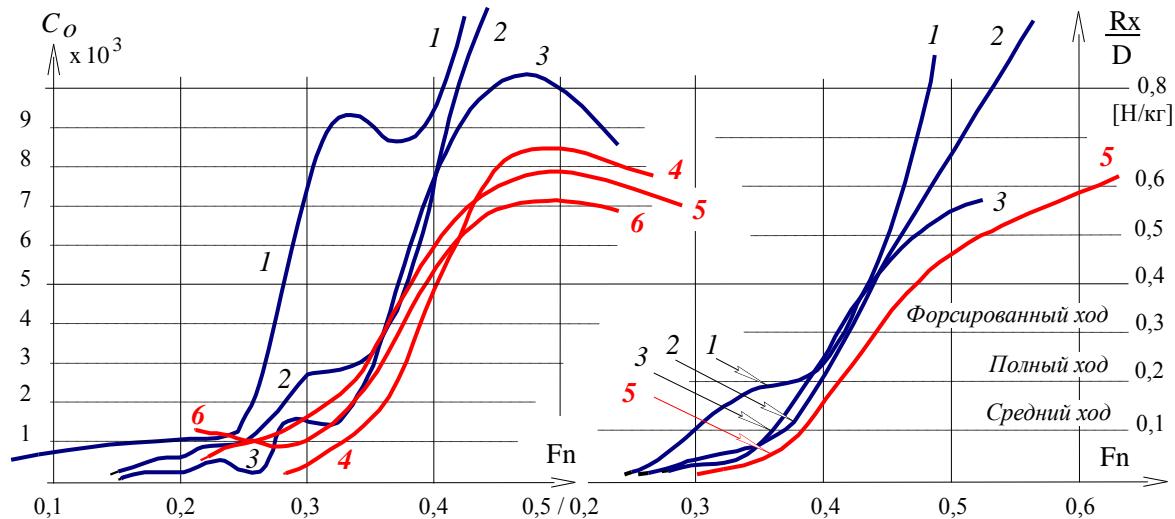


Рис. 85. Кривые безразмерных коэффициентов (слева) и удельного (справа) остаточного сопротивления, соотносимого к водоизмещению для всех опытных моделей: 1. Эталонная модель «Виктори»; 2. Модель 60-й серии; 3. Модель МИДВ, осадка: $T = 135$ мм; 4 – $T = 125$ мм; 5 – $T = 125$ мм, $\Delta T = 20$ мм на корму; 6 – $T = 125$ мм, ход кормой вперед; 1÷3 – испытание в гравитационной системе; 4÷6 – с использованием буксировочной тележки.

Наилучшая ходкость модели МИДВ на больших скоростях хода ($Fn \geq 0,5$) выявлена при посадке: $T = 125$ мм (WL № 7); $\Delta T = 20$ мм на корму (Рис. 85, кривая 5), что соответствует максимальному завалу бортов на уровне точки перегиба контура мидель-шпангоута, а также установке дифферента на корму, при котором выравнивается в среднем горизонтальность плоскости днища, и отчасти восстанавливается плавность закручивания набегающего потока в районе носовой скулы. На средних ходах при $Fn \approx 0,4$ наилучшая ходкость приходится на ту же осадку: $T = 125$ мм (Рис. 85, кривая 4), но уже при посадке без дифферента. Показательным является эксперимент на заднем ходу (Рис. 85, кривая 6), где условный «строительный дифферент на корму» выравнивает и стабилизирует поток на больших скоростях хода, а на средних и

малых ходах интерференционные эффекты не улучшают ходкости модели на тихой воде, что, естественно, столь же негативно отражается на взаимодействии с короткими штормовыми волнами, наносящими удары по развалам бортов в районе скулы.

На графиках справа (Рис. 85) показаны кривые удельного остаточного сопротивления для тех же буксировочных испытаний на тихой воде. В последующих мореходных испытаниях (Рис. 86) такое удельное сопротивление будет характеризовать эффективность по условиям сохранения хода в штормовых условиях плавания, и формально может быть разделено на режимы плавания по номинальной мощности главных машин: $R_x / D \leq 0,1$ [Н/кг] – средний ход; $R_x / D \leq 0,2$ – полный ход; $R_x / D \leq 0,3$ – форсированный ход.

Модели традиционных судов «Виктории» и 60-й серии, не имевшие завала бортов в средней части корпуса, не проявляли способности к снижению интенсивности корабельного волнообразования на больших скоростях хода ($F_n \geq 0,5$), и потому в последующих мореходных испытаниях от них не ожидалось заметного снижения килевой качки на ходу в условиях регулярного волнения.

Анализ записей профилей корабельных волн подтверждает максимум корабельной волны за кормой модели МИДВ на скорости хода порядка $F_n \approx 0,5$. При увеличении скорости хода, $F_n > 0,5$, высота излучаемых волн незначительно снижается, что обусловлено гидродинамической стабилизацией ходового дифферента за счет завала бортов и проявлением эффекта «антаглиссирования», как своеобразного гидродинамического засасывания носовой части корпуса под собственную корабельную волну, с вынужденной (не интерференционной) компенсацией ее главной поперечной составляющей корабельной волны.

В целом экспериментально подтверждается ключевой результат и основное проектное заключение численных расчетов волнового сопротивления, как улучшение ходкости на больших скоростях хода при $F_n \geq 0,5$ за счет уменьшения ширины действующей ватерлинии (завала бортов) в средней части корпуса. В то же время, на ходу за моделью МИДВ всегда наблюдается крутая расходящаяся корабельная волна, выявляющая отсутствие плавного закручивания потока под днище в районе носовой скулы, что в сравнении с традиционными обводами судов отра-

зилось увеличением остаточного сопротивления на полном ходу ($F_n \approx 0,36 \div 0,44$).

Позитивные результаты сравнительных опытных мореходных испытаний положили начало для разработки новых проектов перспективных кораблей и судов, построенных на принципах непротиворечивой оптимизации для достижения наилучшей мореходности в штормовых и ледовых условиях плавания.

Результаты ходовых испытаний и оценка мореходных качеств

Ходовые испытания на тихой воде всегда предшествовали основному циклу сравнительных мореходных испытаний на встречном и попутном волнении.

Первые комплексные мореходные испытания проходили с двумя опытными моделями: гипотетический проект судна МИДВ и быстроходное судно 60-серии с $\delta = 0,572$, в которых действовалась гравитационная тяга и проводились записи графиков мгновенных значений скорости, углов кильевой качки, а также профилей волн и корабельного волнообразования в одной точке опытного бассейна на удалении порядка 1 метра от буксировочной линии. Разгон моделей в гравитационной системе на регулярном волнении производился с использованием предварительных настроек на тихой воде, отчего режим установления проходил от больших скоростей хода к меньшим. Каждый прогон модели документировался в реальном времени прорисовкой графиков текущих значений скорости. Показания гироскопа и волнографа синхронно записывались на фотобумагу, которая проявлялась после зарисовки полного рулона.

Регулярное волнение создавалось механическим плунжерным волнопродуктором со следующими стандартными характеристиками волн:

- высота: $h = 0,15, 0,075$ м;
- длина: $\lambda = 1,0, 2,1, 2,9, 4,0$ м,

что ориентировано соответствует высотам волн в половину и по полной осадке испытываемых моделей. На каждой из высот волн проводились построения кривых сопротивления движению и измерения качки под воздействием встречных и попутных волн по четырем градациям от

половины до удвоенной длины корпуса. В последующем анализе данных в параметры генерируемых волн вносились поправки по записям реальных волновых профилей с помощью ёмкостного волнографа.

Проекты новых перспективных судов (Рис. 66, Рис. 71, Рис. 68, Рис. 79, Рис. 81) построены на основе указанных мореходных испытаний, дополнялись более поздними концептуальными решениями непротиворечивого и целевого проектирования судов повышенной штормовой мореходности. Эксперименты с участием телеуправляемых моделей этих судов проходили в опытном бассейне кафедры кораблестроения Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Свободное движение опытных моделей обеспечивалось электродвигателями и системой телеуправления. Непрерывное измерение мгновенных значений скорости хода, бортовой и килевой качки проводилось с помощью 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 опытного бассейна.

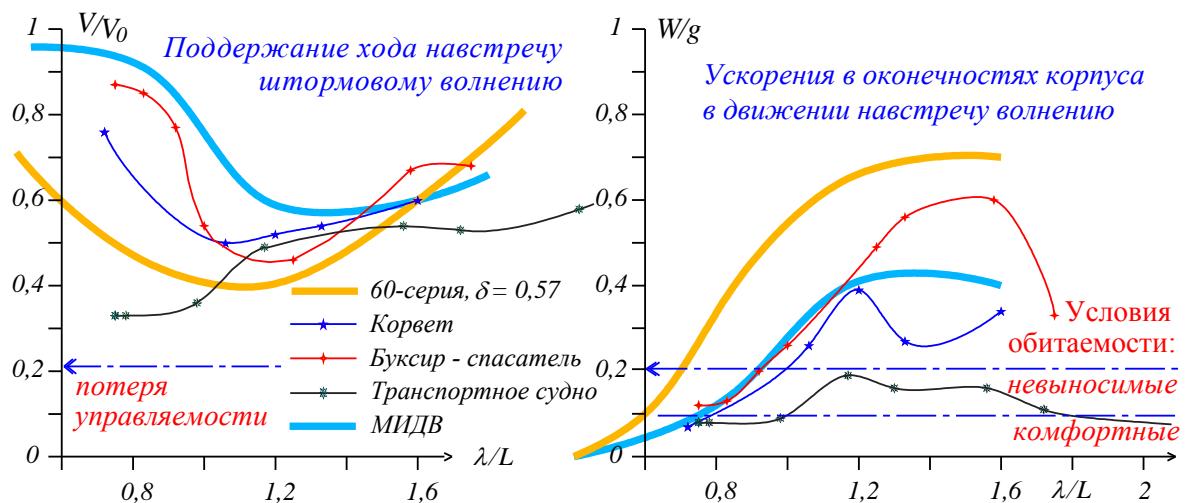


Рис. 86. Результаты мореходных испытаний ходкости (слева) и килевой качки (справа) для серии моделей из стандартного, гипотетического и трех перспективных судов.

По результатам полного цикла всех мореходных испытаний на регулярном волнении (Рис. 86) 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 (СПбГМТУ), и настоящем сравнении выбраны графики для режима полного хода: $R_x/D \approx 0,2$ [Н/кг].

Эксперименты с самоходными моделями перспективных судов в опытном 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 работы гребных винтов, значительно отличавшихся по тяговому усилию от режима движения моделей на спокойной воде.

На графиках ходкости и качки (Рис. 86, 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 телеконтролируемыми 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 опытном бассейне и открытом море, где испытания моделей проводились на настоящем ветровом нерегулярном волнении. Оценки мореходности могут становиться предзнакомствием 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 комфорта 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. 86, справа), согласованное в действии с пассивным механизмом аварийного поддержания штормового хода и управляемости после остановки главных машин [5]. Возможность полезного использования такого крыльевого устройства в штатном и аварийном режимах плавания служит показательным примером непротиворечивого проектирования сложной морской техники.

О Сахалинском морском экспериментальном полигоне для проектных и мореходных изысканий в штормовом море

Современный уровень вычислительный техники, компактность измерительных средств, доступность и быстрота телебработки 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 лучших традициях общемировой морской практики и международного морского права.

Рассмотрим последовательно блок конкретных из имеющихся 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. Все-погодность мореходства определяет экономическую эффективность⁶ 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 волнения (Рис. 42), обновляющихся по правилам идентификации параметров уравнений с помощью бортовых инерциальных систем и средств радионавигации. Простым и надежным регистратором волнения по ходу судна [66] может служить кильевая качка (Рис. 44), 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.

⁶ 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 неграмотного и потому опасного судовождения

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

Используемая на Сахалине 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.

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



Рис. 87. Географическая карта южной части о-ва Сахалин с указанием автомагистралей и морских причалов для спуска на воду опытных моделей судов

Таблица 4. Характеристики ветрового режима на побережье в южной части острова Сахалин

Район побережья	Ветровой режим по многолетним наблюдениям
залив Анива	<i>в среднем – 4,5 м/с, более 156 дней в году > 8 м/с</i>
залив Терпения	<i>май – 6,1 м/с; август – 4,8 м/с; декабрь – 6 м/с</i>
Татарский пролив	<i>55 дней > 15 м/с; 262 дня до 8 м/с; 39 дней – штили</i>

Географические условия в южной части о-ва Сахалин, наличие крупных озер и морских причалов (Рис. 87), ветра и прибрежное волнение

ние в любые сезоны года (**Таблица 4**), определяют наилучшие в России условия для проведения мореходных испытаний телевизуемых моделей перспективных и действующих кораблей и 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. В частности:

– 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, проверяемым на телевизуемых моделях в открытом море на морском полигоне.

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

Вариант проектных исследований. По результатам вычислительных и опытных экспериментов оптимизируется форма корпуса судна для достижения минимального ходового дифферента и минимального волнодвижения на всех скоростях хода, включая критически 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 опытном 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 ходовой 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 помощью 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 последую-

щим 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.

Заключение о сахалинской морской научной школе

Общемировая практика морских исследований, связанных с оптимизацией морских работ и повышением эффективности мореходства, всегда опирается на опыт хорошей морской практики и сопутствующие научные исследования, на показательные натурные и модельные эксперименты, проводимые авторитетными региональными морскими инженерами непосредственно в тех морских акваториях, для которых выполняется проектирование и строительство нового флота в комплексе с оборудованием прибрежных акваторий и гаваней морских портов.

В материалах морских исследований на базе Сахалинского государственного университета имеет значение повсеместное использование новейшей измерительной и вычислительной техники, сопрягаемой со средствами широкополосной радиосвязи, в том числе для дистанционного управления и прямых видеонаблюдений за сложнейшими процессами взаимодействия опытных моделей с интенсивным морским волнением.

Опережающее развитие современных информационно-аналитических средств и методов моделирования физических процессов ныне способны к настоящему единению проектно-инженерных работ, с последующей эксплуатационной оптимизацией или модернизацией морской

техники, как и всей инфраструктуры для ее обслуживания. Это означает необходимость существенного повышения научно-технического потенциала региональной морской науки, где возможно практическое единение научного потенциала реального морского инженерного дела.

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 рабочее освоение национальных морских ресурсов и ресурсов морского дна, и дальних морских коммуникаций в интересах России.

Благодарности

Диссертационное исследование в целом представляется обобщением результатов многочисленных конструктивных дискуссий, совместных проектных разработок и инженерных кораблестроительных изысканий с преподавателями Морского института ДВГТУ во Владивостоке: *Сергеем Владимировичем Антоненко и Виктором Григорьевичем Бугаевым*; кафедры кораблестроения КнАГТУ в Комсомольске-на-Амуре: *Сергеем Демидовичем Чижиумовым и Николаем Александровичем Мытником*; кафедры теории корабля Ленинградского кораблестроительного института (ныне СПбГМТУ): *Александром Николаевичем Ходилиным, Вальтером Борисовичем Амфилохиевым и Леонидом Сергеевичем Артюшковым*; и факультета кораблестроения ВВМИ в Санкт-Петербурге: *Сергеем Ивановичем Кроленко*.

Настоящими авторами практически всех интереснейших наставлений мореплавателям и инженерных кораблестроительных новаций необходимо признать корабельных наставников 60-70-х годов, мастеров судомодельного спорта, знатоков истории Русского флота и ярких учителей морской грамотности: *Александра и Владимира Михайловичей Лагутиных, Юрия Анатольевича Аксёнова*; передавших эстафету морского

просвещения и освоения хорошей морской практики авторитетнейшим преподавателям и морским офицерам Калининградского мореходного училища: *Александру Алексеевичу Камышеву, Григорию Степановичу Маленко, Далену Янгелевичу Бронштейну и Евгению Васильевичу Миронову*, при страстной поддержке замполита *Виктора Николаевича Стрекина* наполнившим курсантское любопытство бесценными технико-историческими познаниями о морских инженерных достижениях мореходов начала XX века.

Воплощением фундаментального тезиса адмирала *Ивана Алексеевича Шестакова*: «Изобретательство без пользы в морском деле недопустимо» – с тех пор пророчит успех экспериментальной и теоретической проверки исторических кораблестроительных достижений в создании всесезонного и всепогодного океанского флота и морской инженерной инфраструктуры для неограниченно дальних походов и бесперебойных морских работ.

На Сахалине морские изыскания инициированы госзаказом Главного управления кораблестроения России, и доведены до современного уровня поддержкой научно-просветительского гранта нефтепромысловой компании «Сахалинская Энергия». Текущие изыскания продолжаются на базе Сахалинского отделения и подсекции мореходных качеств судов в штормовых условиях Российского научно-технического общества судостроителей имени Алексея Николаевича Крылова.

Общее заключение

Эксплуатационная эффективность определяется способностью судна выполнять поставленные задачи в характерных для географического региона условиях штормового и ледового плавания. Современные экспериментальные и опытные исследования в области гидромеханики корабля позволяют обоснованно использовать новые проектно-технические решения, основанные на судоводительском опыте активного штормового маневрирования, изначально согласованного с требованиями хорошей морской практики палубных работ в сложных, штормовых и ледовых условиях. Рассматриваемые технические решения повреждены жесткими ограничениями концепции непротиворечивого проектирования всепогодного океанского судна, как единого инженерного сооруже-

ния, что в хорошей морской практике соответствует определению, что на борту красивого корабля нет ничего лишнего.

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 опытном бассейне Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Свободное движение телеуправляемых самоходных моделей на интенсивном регулярном волнении поддерживалось с помощью бортовых электродвигателей и системы радиоуправления. Измерение скорости хода выполнялось видеофиксацией прохождения метровых меток на внутренних стенках опытного бассейна, бортовая и килевая качка измерялись с помощью бортовых цифровых регистраторов, что контролировалось с использованием цифровой радиотелеметрии.

В планировании экспериментов учитывалась возможность сопоставления результатов с испытаниями модели судна с малыми моментами инерции действующей ватерлинии (МИДВ-85) и модели быстроходного судна 60-серии с коэффициентом общей полноты: $\delta=0,572$, проведёнными в 1985 г. в опытном бассейне кафедры теории корабля Ленинградского кораблестроительного института (*ныне – Санкт-Петербургского морского технического университета*) под руководством профессора А. Н. Холодилина [67].

В результате серии вычислительных и опытных экспериментов показано положительное влияние завала борта на условия ходкости, маневренности, обитаемости и безопасности штормового плавания. Экспериментально подтверждена гидродинамическая компенсации бортовой качки судна в случае обратной кривизны шпангоутного контура с максимальным завалом борта в средней части корпуса на уровне действующей ватерлинии.

Из анализа влияния корпуса на корабельное волнобразование получены оптимальные геометрические построения сколовых обводов и формы надводного борта судна. В испытаниях телеуправляемых моде-

лей в штормовом море получено подтверждение гидродинамической минимизации килевой качки и сохранения ходкости корабля в условиях интенсивного волнения и ветра.

В случае глубокой оптимизации формы корпуса и общекорабельной архитектуры по условиям минимизации силового воздействия штормового волнения, динамика судна может стать чувствительной к инородным нелинейным эффектам, которые в традиционном проектировании считаются несущественными. Для решения новой проблемы разработано унифицированное устройство активной стабилизации килевой и бортовой качки оптимизированного корпуса, согласованное в действии с пассивным механизмом аварийного сохранения штормового хода и управляемости судна после остановки главных машин.

Для законченного решения проектно-оптимизационной задачи предложены новые технические решения по активной стабилизации остаточной качки на ходу корабля. Как это и полагается в хорошей морской практике, найдено не только единственно эффективное местоположение активных крыльевых стабилизаторов в потоке за гребными винтами корабля, но именно в этом местоположении поворотные крылья на упругих баллерах обосновано по возможности и способности к работе в качестве пассивных аварийных штормовых движителей, что стало хорошим проявлением синтеза инженерных решений в реализации принципов непротиворечивого проектирования сложных морских устройств.

В основе новых проектно-технических решений синтезирован реальный судоводительский опыт активного штормового маневрирования, согласованный со знанием хорошей морской практики палубных работ в сложных, штормовых и ледовых условиях, с поверкой разработок в жестких ограничениях концепции непротиворечивого проектирования всепогодного океанского судна.

Литература

1. Артюшков Л.С. Динамика неильтоновских жидкостей. СПб.: Изд. ГМТУ, 1997. 460 с
2. Артюшков Л.С. Расчеты сопротивления воды движению морских транспортных судов. Л.: ЛКИ, 1980. 88 с.
3. Артюшков Л.С. Расчеты сопротивления при движении судов в особых условиях. Л.: ЛКИ, 1983. 64 с.
4. Ашик В.В. Проектирование судов. Л. – Судостроение, 1975. – 352 с.
5. Благовещенский С.Н. Качка корабля. Л.: Судпромгиз, 1954. 520 с.
6. Благовещенский С.Н., Холодилин А.Н. Справочник по статике и динамике корабля. Л.: Судостроение, 1976. 312 с.
7. Бронштейн Д. Я. Устройство и основы теории судна. – Л.: Судостроение, 1988. – 336 с.
8. Букишев Анатолий Владимирович, Одегова Ольга Витальевна. Проектирование морских транспортных судов: учеб.-метод. пособие по курсовому проектированию / СПбГМТУ; СП., – 2008. – 36 с.
9. Войткунский Я.И. Гидромеханика. Л.: Судостроение, 1982. 456 с.
10. Войткунский Я.И. Сопротивление воды движению судов. Л.: Судостроение, 1964. 412 с.
11. 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.
12. 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. 322 с.
13. Готман А.Ш. Проектирование обводов судов с развертывающейся обшивкой. Л.: Судостроение, 1979. 192 с.
14. Кацман Ф.М., Пустошный А.Ф., Штумпф В.М. Пропульсивные качества морских судов. Л.: Судостроение, 1972. 320 с.
15. Клейтон Б., Бишоп Р. Механика морских судов: Пер. с англ. Л.: Судостроение, 1986. 436 с.
16. Костюков А. А. Сопротивление воды движению судов. Л.: Судостроение, 1966. 448 с.

17. Костюков А. А. Теория корабельных волн и волнового сопротивления. Л.: Судпромгиз, 1959. 310 с.
18. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Ч. I. М.: Физматгиз, 1959. 584 с.
19. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Ч. II. М.: Физматгиз, 1959. 728 с.
20. Кроленко С. И., Храмушкин В. Н. Ключевые проектные решения и особенности штормового кораблевождения // Доклады научно-технической конференции «Проблемы мореходных качеств судов, корабельной гидромеханики и освоения шельфа» (XLIV Крыловские чтения). СПб: ЦНИИ им. А.Н. Крылова, Центральное Правление РосНТО судостроителей им А.Н. Крылова. Пленарный доклад по секции мореходных качеств судов. 15-16 ноября 2011 г., Санкт-Петербург. С. 72-85.
(www.shipdesign.ru/News/2009/STAB-rus.html).
21. Крылов А.Н. Избранные труды. Л.: Академия наук СССР, 1958. 804 с.
22. Крылов А.Н. Лекции о приближенных вычислениях. Л.: Академия наук СССР, 1933. 541 с.
23. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1973. 848 с.
24. Каменский Е. В., Терентьев Г. Б. Траулеры и сейнеры. – Л.: Судостроение, 1978. – 216 с.
25. Прандтль Л., Титтенс О. Гидро- и аэромеханика. Т. 1. Равновесие. Движение жидкостей без трения. М.Л.: Государственное технико-теоретическое издание, 1932. 222 с.
26. Прандтль Л., Титтенс О. Гидро- и аэромеханика, Т. 2. Движение жидкостей с трением и технические приложения. М. Л.: Государственное технико-теоретическое издание, 1935. 312 с.
27. Проблемы прикладной гидромеханики судна. / Под редакцией Титова И.А. Л.: Судостроение, 1975. 352 с.
28. Семенов-Тян-Шанский В.В. Статика и динамика корабля. Л.: Судостроение, 1973. 603 с.
29. Семенов-Тян-Шанский В.В., Благовещенский С.Н., Холодилин А.Н. Качка корабля. Л.: Судостроение, 1969. 392 с.
30. Справочник по теории корабля. Т. 1. / Под редакцией Войткунского Я.И. Л.: Судостроение, 1985. 764 с.
31. Стокер Дж. Волны на воде. М.: Иностранная литература, 1959. 618 с.

32. Титов И.А., Егоров И.Т., Дробленков В.Ф. Ходкость быстроходных судов. Л.: Судостроение, 1979. 256 с.
33. Управление судном и его техническая эксплуатация [Учебник для судоводительских специальностей высших инженерных морских училищ] / А. И. Щетинина, Г. М. Алексеев, Г. В. Евдокимов, Е. И. Жуков, М. М. Лесков, М. Н. Либензон и др.; Под общ. ред. капитана дальнего плавания А. И. Щетининой. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1975. – 608 с.: ил. – Загл. 1-го изд.: Морское дело. – Библиогр.: с. 603.
34. Ханович Х. Сопротивление воды движению судов. М.: Военное издание. МВС, 1946. 316 с.
35. Хаскинд М.Д. Гидродинамическая теория качки корабля. М.: Наука, 1973. 327 с.
36. Холодилин А.Н. Стабилизация судна на волнении. Л.: Судостроение, 1972. 232 с.
37. Храмушин В. Н. Поисковые исследования штормовой мореходности корабля. Владивосток: Дальнаука, 2003. – 172 с.
38. Khramushin Vasily N. Stormy seakeeping and navigation safety researches for hull form design / Proc. of the 2nd Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics. Sangman International House, Busan, Korea, June 21-22, 2004. P.398-402.
39. Храмушин В. Н. Активный стабилизатор килевой и бортовой качки корабля – штормовой аварийный двигатель // Патент № RU2384457 от 20.03.2010 г. – Бюл. № 8. – Рег. № 2008116649, от 24.04.2008 г.
(www.shipdesign.ru/Invent/04.html).
40. Храмушин В. Н. Корабль без бортовой качки на волнении.
Патент № RU2360827. (www.shipdesign.ru/Invent/01.html,
www.Youtube.com/Khramushin - «Ship with small rolling on heavy waves in towing tank», «Historical Ship on Hurricane Storm Waves»)
41. Храмушин В. Н. Корабль без килевой качки на ходу на волнении. Заявка на изобретение № 2007133625 (www.shipdesign.ru/Invent/02.html,
www.Youtube.com/Khramushin - «China-1275 from Marco Polo's Map with Ship on Pacific Ocean»)
42. Храмушин В. Н. Корабль гидрографической и патрульной службы // Патент № RU2384456 от 20.03.2010 г. – Бюл. № 8. Рег.№ 2008117748, от 4.05.2008 г. (www.shipdesign.ru/Invent/05.html).

43. *Храмушин В. Н.* Корабль, остойчивый в штормовом плавании. Патент № 2487043 от 1 ноября 2012 г. Составлено 17.01.2011 г. Рег.№ 2011129192 от 12.07.2011 г., (Бюл. №2 от 20.01.2013 г.), решение о выдаче патента от 01.11.2012 г. shipdesign.ru/Invent/06.html
44. *Храмушин В. Н.* Рыболовное судно северных морей. Патент № 2535382 от 2014.07.28 (Бюл. № 34 от 2014.12.10), Shipdesign.ru/Invent/07.html
45. *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. Заявка: рег. № 2015107067/11(011473) от 2015.03.02.
shipdesign.ru/Invent/08.html
46. *Храмушин В. Н.* Кормовая оконечность стабилизированного для штормового плавания корабля – «Ахтерштевень и кормовой подзор корабля» (Stern). Патент № RU-2607135 от 2015.03.02. shipdesign.ru/Invent/09.html
47. *Храмушин В. Н.* Универсальное транспортное судно (Univer86). СахГУ: Патент № RU-2 603 709-C1 от 2015-07-03, Бюл. 33 2016-11-27.
48. *Храмушин В. Н.* Морской спасатель – научно-исследовательское судно (A1202). СахГУ: Патент № RU-2 603 818-C1 от 2015.07.03, Бюл. 33 2016-11-27.
49. *Храмушин В. Н.* «Каботажное пассажирское судно» (A1205). *Патент № RU-2653906-C1*, бюл. № 14 от 2018-05-15. Shipdesign.ru/Invent/12-Coaster.html.
50. *Храмушин В. Н.* «Надводный борт и верхняя палуба корабля» (Deck). Заявка на изобретение: № 2016150045 от 2016-12-19 (составлено 2016-12-01)
shipdesign.ru/Invent/13-Ship_Deck.html
51. *Храмушин В. Н.* «Hull» – Построение аналитической формы корпуса корабля, расчеты волнового сопротивления, кривых элементов теоретического чертежа и диаграмм остойчивости морских судов. СахГУ № 2010615849, 8.9.2010 г. Shipdesign.ru/SoftWare/2010615849.html
52. *Храмушин В. Н.* «Программа для построения числовых объектов и функций трехмерной тензорной математики при реализации вычислительных экспериментов в гидромеханике» (Tensor). СПбГУ № 2013619727 от 14 октября 2013 г. <http://shipdesign.ru/SoftWare/2013619727.html>;

53. Богданов А. В., Храмушин В.Н. «Интерактивный графический программный комплекс для моделирования взаимодействия поляризованных корпускул в трехмерном пространстве» (Ядро). СПбГУ № 2013619726 от 14 октября 2013 г. <http://shipdesign.ru/SoftWare/2013619726.html>;
54. 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 14 октября 2013 г.
55. 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. <http://shipdesign.ru/SoftWare/2015618259.html>;
56. Богданов А. В., Храмушин В. Н. База данных: «Цифровые теоретические чертежи для проектного анализа гидростатических характеристик, остойчивости и ходкости корабля» (Vessel). СПбГУ № 2015621368 от 8 сентября 2015 г. <http://shipdesign.ru/SoftWare/2015621368.html>;
57. Khramushin V. N. Key Design Solutions and Specifics of Operation in Heavy Weather (Fluid Mechanics Approach to Stabilization of Ship in Heavy Seas) // 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. P. 473-482
58. “A Naval Perspective on Ship Stability”. Arthur M. Reed. Carderock Division, Naval Surface Warfare Center // STAB-2009.
59. “Stabilized Tumblehome Hull Form”. Gabor Karafiath. Secretary of NAVY. United States Patent № 6,601,529, B1. Aug. 5, 2003.
60. 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.

61. *Храмушин В. Н.* Поисковые исследования штормовой мореходности корабля (История эволюционного развития инженерно-технических решений об обводах и архитектуре корабля, о единении морских наук и хорошей морской практики). LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG. Dudweiler Landstr. 99. 66123 Saarbrücken, Germany. (2011-01-20, 288 с).
62. *Mitchell, J. H.* The wave resistance of a ship // Philosophical Magazine. – Ser. 5.– London: 1898.– Vol. 45.– P.106–123. (www.shipdesign.ru/JHM.html)
63. *Храмушин В.Н.* Штормовые мореходные изыскания в проектировании дальневосточного флота // Доклады научно-технической конференции «Проблемы мореходных качеств судов и корабельной гидромеханики» (XLIV Крыловские чтения 2013 г.). 22-23 сентября 2013. г. Санкт-Петербург. С. 98-101.
64. *Vasily Khramushin.* Features architecture of mean ship to navigation in heavy, stormy and ice conditions on the northern seas // Proceedings of the 14th International Ship Stability Workshop / Session 2nd Naval Ship Stability, 29th September – 1st October 2014, Kuala Lumpur, Malaysia. P. 47-57.
65. *Храмушин В. Н.* Исследования по оптимизации формы корпуса корабля. Вестник ДВО РАН. 2003, № 1(107). С. 50-65.
66. *Храмушин В. Н.* Навигационный комплекс контроля состояния моря, атмосферы и мореходности корабля // Крыловские чтения. Проблемы мореходных качеств судов и корабельной гидромеханики / Сборник избранных докладов. 21-23 октября 2003 г. (6-10 декабря 2006 г). – СПб, Изд-во Остров. 2007. – 109 с. С. 17-32.
67. *Храмушин В. Н.* Оптимизация мореходных качеств надводных судов. // XLI студенческая научно-техническая конференция 18 февраля – 30 марта 1986 г., Ленинградский ордена Ленина кораблестроительный институт, Л., 1986, 104 с. / Ауд. Б-318, 10 марта, 10 ч. С. 42. рук. *дтн проф. Холодилин А. Н., ктн доц. Ачкинадзе А. Ш.*