

Штормовая мореходность корабля (вычислительный эксперимент)

Vessel on Stormy Waves (computational experiment)

236039 Калининград,
190121 Ленинград,
690095 Владивосток,
191186 Санкт-Петербург,
198504 Старый Петергоф,

Калининградское мореходное училище, Судоводительское отделение.
Ленинградский кораблестроительный институт, Кораблестроительный факультет, кафедра гидромеханики.
Дальневосточный государственный технический университет, кафедра теории и проектирования корабля.
Российское научно-техническое общество судостроителей им.Алексея Николаевича Крылова.
Санкт-Петербургский государственный университет, факультет Прикладной математики – процессов управления,
кафедра компьютерного моделирования и многопроцессорных систем,

ул. Мореходная, 3
ул. Лодманская, 3
ул. Пушкинская, 10
Невский проспект, 44
Университетский проспект, 35

Рабочие записи

Вычислительные эксперименты с моделированием гидромеханики взаимодействия корабля и штормового океана крайне значимы в обоснованиях ключевых технических решений на ранних этапах проектирования перспективного всепогодного корабля, также как и в последующем синтезе положений морской грамотности с обновлениями наставлений мореплавателям для конкретных типов кораблей, для заданных навигационно-гидрографических и гидрометеорологических условий штормового мореходства. Прямое численное моделирование востребуется в оперативной обстановке для экспериментальной проверки навигационных решений бортовыми счётно-решающими приборами, что важно в обеспечение действий корабля по прямому назначению, оперативной подготовки оптимальных и безопасных маневров, выбора параметров наилучшей ходкости и/или обитаемости в сложных, штормовых или аварийных условиях кораблевождения на дальних коммуникациях и рыбных промыслах Дальнего Востока России.

Исходный уровень морских математических изысканий обуславливается поиском быстрых алгоритмов для представления кинематики скоростей течений и гидродинамических давлений во всей толще воды с интенсивным трохоидальным волнением, которые включаются в модели гидромеханики силового воздействия на корпус свободно маневрирующего в штормовом море корабля.

Чисто кораблестроительное направление исследований посвящено вопросам проектирования обводов и формы корпуса всепогодного корабля, способного к эффективному исполнению задач по основному назначению в штормовом море под воздействием ураганных ветров, с обязательным учетом навигационно-географических условий мореходства в конкретных океанских или прибрежно-озерных условиях российского флота.

Основные практические выводы в работе сводятся к выбору курса и скорости хода судна с позиций достижения эффективного хода, минимизации всех видов качки, либо – обеспечения безопасности штормования с использованием судовых машин, аварийных парусов или, с оценками возможности пассивного дрейфа по воле ветра и волн.

Актуальность проводимых научных исследований в целом обуславливается уникальными особенностями мореходства в штормовых и ледовых условиях России, где ожидание хорошей погоды приводит к неприемлемым простоям и экономическим потерям в штормовании на условно безопасных курсах.

Ключевые слова: гидромеханика, вычислительный эксперимент, мореходные качества корабля, штормовое плавание, волны Герстнера, кноидальные волны.

Оглавление

Синтез проектных предпосылок из анализа гидростатики, остойчивости и ходкости корабля на тихой воде.	3
<i>Запас остойчивости кораблей с различным формированием обводов в средней части корпуса</i>	7
Предварительные заключения по штормовой остойчивости и гидродинамике корабля	18
<i>Корабельное волнообразование – отражение штормовых волн от корпуса корабля</i>	27
Распределение гидродинамических сил по обшивке корпуса корабля	29
Поверочная модель корабельного волнообразования	31
Корабль без килевой качки на ходу на волнении	40
«Носовая оконечность быстроходного надводного корабля или относительно тихоходного гражданского судна повышенной штормовой мореходности и ледовой проходимости в автономном плавании»	43
«Кормовая оконечность стабилизированного для штормового плавания корабля»	47
Надводный борт и верхняя палуба корабля	51
Активный стабилизатор килевой и бортовой качки корабля – штормовой аварийный движитель	56
Корабль с плавниковым движителем	58
Постановка и проведение прямых вычислительных экспериментов с кораблём в штормовом море	61
<i>Особенности реализации штормовых опытовых и вычислительных экспериментов</i>	63
<i>Бортовые кили и крылья активных успокоителей качки</i>	64
<i>Мореходные испытания кораблей перспективного и действующего флота</i>	70
<i>Групповые структуры трогоидальных волн на море и особенности штормового кораблевождения</i> +++	75
<i>Особенности штормового кораблевождения</i>	77
Технические предложения по оптимизации мореходных качеств корабля в штормовых условиях плавания	80
<i>Список рисунков</i>	81
Использованные источники исследований	85
<i>Программные комплексы и базы данных</i>	86
<i>Патенты и заявки на изобретения</i>	87
<i>Полезные модели</i>	89

Синтез проектных предпосылок из анализа гидростатики, устойчивости и ходкости корабля на тихой воде.

Корабельная гидромеханика, так же как и волновые процессы на поверхности моря не изобилуют разнообразием геометрических форм и сложностями динамических процессов, существенно ограничивающихся законами неразрывности жидкости в условиях сохранения и равномерного распределения энергии штормовых волн среди условно малых объемов водной среды.

Рассматривая возможности повышения эффективности морских коммуникаций, представляется весьма актуальным детальный анализ гидромеханики корабля в ураганных ветрах и на предельно интенсивном океанском или прибрежном волнении, что важно как для проработки вариантов уверенного маневрирования корабля в сложных погодных условиях, для обоснованного выбора курса и скорости судна при уклонении от реальных опасностей, неизбежно возникающих на прибрежных или мелководных морских маршрутах.

Таким образом, проектные особенности, мореходные качества и условия маневрирования корабля в реальном штормовом плавании должно классифицироваться по трём уровням навигационно-гидрографической и гидрометеорологической обстановки на мелководных фарватерах или открытых акваториях глубокого моря:

1 – штормовой ход на глубокой воде в условиях проявления девятых валов под ураганными ветрами, и особо на иррегулярной толчее в центре циклона;

2 – ход на континентальном шельфе, и особо – на морских мелководных банках, где глубина моря становится меньше длины штормовой волны;

3 – плавание на материковых отмелях, при особо опасных проявлениях рефракции с интерференцией длиннопериодной зыби у отмелого побережья.

В отработке проектных решений по новому кораблю необходимы изначальные обоснования в форме наставлений мореплавателям по выбору оптимальных режимов штормового хода или штормования, в том числе опирающихся на реальный опыт навигации в особых гидрометеорологических условиях, что необходимо для обоснованного выбора и назначения хода и курса корабля по следующим критериям:

*о наставлениях
мореплавателям*

а) наилучшая ходкость на заданном маршруте по оптимальной локсодромии или в условиях лавирования относительно гребней штормовых волн;

б) обоснование курса и скорости хода для достижения наилучшей обитаемости на борту корабля в плане снижения интенсивности или обеспечения плавности всех видов качки;

с) разрешения проблемы выбора безопасного штормования на курсах носом на волну, вразрез волне, лагом вдоль гребней волн или по волне, что особо востребуется в случаях аварийного снижения мощности главных машин или других ограничениях управляемости, при смещениях грузов и частичных затоплениях судовых отсеков.

При востребовании опыта хорошей морской практики [Л] непротиворечивое или целевое проектирование всепогодного корабля целесообразно ориентировать на оптимальное построение обводов корпуса и общекорабельной архитектуры для глубоководных акваторий открытого моря, при обязательной последующей всесторонней отработке наставлений мореплавателям для прохождения узкостями и прибрежными фарватерами с минимальными потерями от воздействия крутых кноидальных гребней и тягунов близбереговой длиннопериодной зыби.

В реальной морской практике совсем непросто формализовать опыт экстремального кораблевождения, что обусловливается невозможностью и опасностью практического опробования мореходных качеств судна на различных штормовых курсах и скоростях хода. Также трудно признавать корректным анализ судовых журналов, с присущими субъективными факторами судоводительских решений вкупе с «вычищаемыми от лишнего» записями. Частичному решению проблем адекватности экспедиционного опыта штормового маневрирования может служить задействование независимой телеметрии для контроля ходкости, качки и, возможно, прочности корпуса, с последующим анализом результатов столь дорогостоящих корабельных испытаний. Наблюдения в интересах отработки наставлений мореплавателям весьма полезны по первым выходам и в процессе всепогодной эксплуатации корабля, но всё же, такой послепроектный анализ мореходности располагает недоопределённой по составу и слабой по качеству измерительной информацией, и даже при серьёзной штормовой трёпке никто не будет рисковать кораблём и экипажем, а значит, не будут складываться достаточно полные или значимые морские исследования.

Полноценные и всеобъемлющие изыскания по штормовой мореходности с обоснованиями практических наставлений мореплавателям, для конкретных проектов кораблей, могут быть отработаны исключительно по результатам серии прямых

к морской практике

*к обоснованию
вычислительного*

вычислительных экспериментов. К тому же, в таком варианте к наставлениям мореплавателям возможно представление тех же специализированных по конкретному проекту математических моделей и вычислительных экспериментов в составе штурманской расчётно-информационной аппаратуры. Тогда, в оперативной обстановке, с использованием визуальных оценок состояния моря и показаний бортовой телеметрии, будут выполняться аналогичные проектным обоснования мореходных качеств, но уже для выработки конкретных навигационных решений:

- о вариантах достижения эффективной ходкости или наилучшей обитаемости на борту корабля;

- для оценки опасных критериев и прогноза возможных морских катастроф, с быстрой выработкой команд по назначению безопасной скорости хода или режима маневрирования относительно гребней штормовых волн; о необходимости срочного перемещения балласта; или, к примеру, об аварийной постановке штормовых парусов и/или плавучих якорей и др.

Предпроектные изыскания на ранних этапах отработки корабельных обводов в диапазонах рабочих посадок и надводного борта

*гидростатические оценки
и ориентация на ходкость*

корпуса корабля, вполне допускают гидростатические оценки по запасам остойчивости на больших углах крена, с уменьшением моментов инерции площадей переменных ватерлиний для лучшей штормовой ходкости при малой килевой качке. Как показывает практика прорисовки теоретических чертежей, оба геометрических условия прекрасно дополняют друг друга, и в пределе приводят к подклассам корабельных корпусов с уменьшенными моментами инерции площади действующей ватерлинии (МИДВ).

Для решения означенных задач специально создавался и будет задействоваться программный комплекс «Hull» (Корпус), в котором предусмотрено построение разнообразных аналитических обводов корпуса, считывание цифровых теоретических чертежей в форме таблиц плазовых ординат и их быстрая трансформация с оценками гидростатики, с возможностью построения кривых элементов теоретического чертежа и диаграмм остойчивости в широком диапазоне действующих осадок, дополняемых возможностью теоретических оценок волнового сопротивления, с визуализацией интенсивности зарождающегося корабельного волнообразования вдоль корпуса корабля.

Предварительно заметим неполную обоснованность силового подавления

*о бедах дифференциальных
уравнений качки корабля*

интенсивной бортовой или килевой качки с помощью днищевых или бортовых килей, которые в реальной морской практике более откликаются на быстрые поперечные потоки в толще воды под гребнями штормовых волн. Турбулентное сопротивление на бортовых килях вместо апериодического подавления резонанса может излишне раскачивать корабль на крутых штормовых склонах.

Локальные скорости в гребнях волн превышают скорость хода корабля, отчего крылья активных успокоителей качки оказываются в потоках неизвестного направления, усугубляемого еще и бортовой качкой корабля, приводящих к неадекватным управляющим откликам на забортных «успокоителях» качки. В гидродинамических экспериментах следующей главы отчасти рассматриваются паразитные свойства подводных забортных устройств, крыльевых или рулевых плоскостей и дейдвудных кронштейнов, которые без специальной доработки корабельных обводов могут усиливать качку в интенсивных волновых потоках вблизи обшивки корпуса корабля.

В следующем разделе начнем рассмотрение влияния гидростатических характеристик и особенностей корпуса в планах:

- запасов остойчивости в условиях интенсивной вертикальной качки;
- влияние изменчивости моментов инерции по площадям ватерлиний;
- изменчивости формы шпангоутов для минимизации интенсивности корабельного волнообразования, в предположении аналогичного эффекта уменьшения силового воздействия штормовых волн со сходными динамическими характеристиками.

Запас остойчивости кораблей с различным формированием обводов в средней части корпуса

Оптимальным вариантом снижения интенсивности качки корабля является предельно возможное снижение начальной метацентрической высоты, отчего возрастает период собственных поперечных колебаний корпуса, и после превышения видимого периода активно действующих морских волн будет ожидаться заметное ослабление бортовой качки корабля. Заметим здесь, что правило применимо для кораблей, изначально подготовленных к штормовому океанскому плаванию, и может привести к опасности опрокидывания кораблей с обводами более эстетического характера.

Рассмотрим вопросы обоснования означенных мореходных качеств корабля. Максимальная интенсивность бортовой качки ожидается в случае резонансного совпадения периодов бортовой качки корабля и видимых периодов штормовых волн. Ожидаемые характеристики штормового волнения соответствуют навигационно-гидрографическим условиям акватории, что позволяет ориентироваться на географические особенности района плавания при проектировании нового корабля, и включаться в региональные наставления мореплавателям для организации эффективных морских коммуникаций.

Так, штормовые волны открытого моря, оценочно можно полагать групповыми структурами прогрессивных трохoidalных волн, динамические параметры которых оцениваются периодами в 6-8 секунд с длиной 56-100 метров и высотой до 6,7-12 метров для Охотского моря, и до периодов в 10-12 секунд с длиной 156-225 метров и высотой 18,6-26,8 метров для открытых акваторий Тихого океана.

В реальной морской практике, для примера, отмечались периоды собственных колебаний при бортовой качке траулера типа «Атлантик» порядка 16 секунд, а пассажирского судна «Любовь Орлова» около 30 секунд, что естественно создавало комфортные условия для пассажиров и экипажа в Атлантическом океане и в штормовом Японском море, соответственно.

С помощью капитанской формулы:

$$\tau = C_g B / \sqrt{h} \Rightarrow h = (C_g B / \tau)^2$$

где τ [сек] – собственный период бортовой качки, h [м] – метацентрическая высота; B [м] – ширина корпуса, C_g – эмпирический параметр для такого класса

судов оценивается величиной $C_g \approx 0,8$. Оценивая действующую метацентрическую высоту этих судов:

$$h = (0,8 \cdot 13,6/16)^2 = 46,2 \text{ [см]} - \text{РТМ «Атлантик»};$$

$$h = (0,8 \cdot 16,24/30)^2 = 14,4 \text{ [см]} - \text{теплоход «Любовь Орлова»}.$$

Капитан и грузовой помощник уверенно аргументируют достаточность остойчивости вверенных им судов, что отвечало уровню морской грамотности и хорошей морской практике по снижению интенсивности бортовой качки.

Определяя необходимость детального рассмотрения ключевых методик по оценкам остойчивости и возможной опасности опрокидывания различных кораблей и судов, необходимо ориентироваться на обоснование возможности поддержания предельно малой начальной остойчивости, при обеспечении малого суммарного силового воздействия штормовых волн для широкой полосы переменных ватерлиний в процессе интенсивной вертикальной качки корабля.

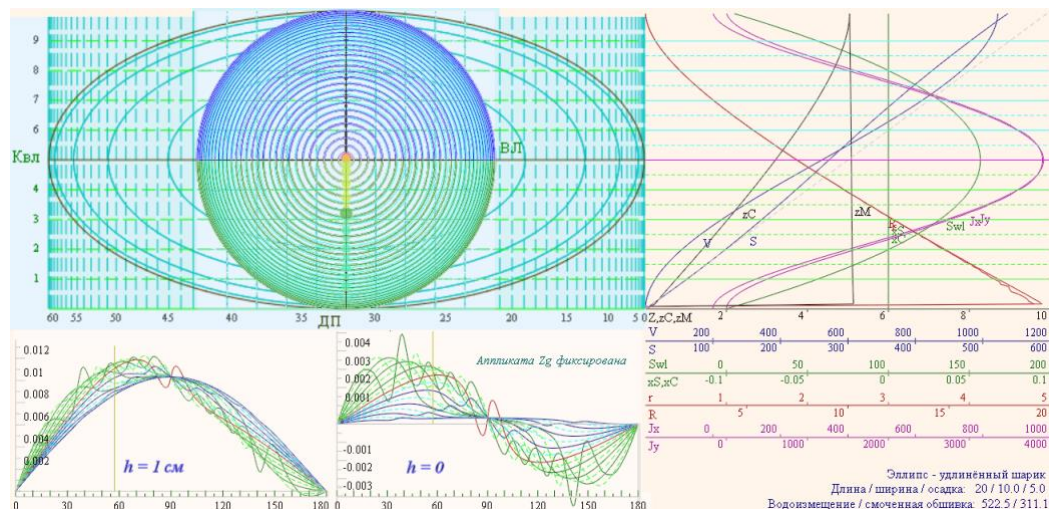


Рис. 1. Проекция бок и корпус теоретических контуров эллипсоида (сверху-слева); для диаграммы остойчивости (слева-внизу) при фиксированном положении центра тяжести (Z_g) и правее – при нулевой начальной метацентрической высоте ($h=0$), и левее – при ($h=1 \text{ см}$) одной тысячной от ширины корпуса ($h=0,1\%B$); справа кривые элементов теоретического чертежа: $zC[\text{м}]$ – аппликата центра величины; $zM \equiv 5[\text{м}]$ – аппликата метacentра; $V[\text{м}^3]$ – грузовой размер; $S[\text{м}^2]$ – смоченная поверхность корпуса; $Swl[\text{м}^2]$ – площадь действующей ватерлинии; $xC=0, xS=0[\text{м}]$ – абсциссы центра величины и центра ватерлинии; $r, R[\text{м}]$ – поперечный и продольный метацентрические радиусы; $Jx, Jy[\text{м}^4]$ – моменты инерции площади действующей ватерлинии относительно продольной и поперечной осей корпуса.

Пагубное влияние забортных выступающих частей, бортовых килей и крыльев активных успокоителей качки, рассматривается в следующей главе с мореходными вычислительными экспериментами.

В качестве простейших или наиболее показательных плавающих тел необходимо рассматривать шар, эллипсоид и цилиндр, вытянутые вдоль продольной оси абсцисс.

В комплексе гидростатических вычислений не ставилось задач по достижению идеальной точности, все расчёты выполняются строго по общепринятым в теории корабля методикам с использованием оцифрованных таблиц ординат шпангоутов, в интегрировании по контурам и по шпациям здесь осознанно не применяются криволинейные интегралы, с обязательным сохранением аппроксимационных огрехов метода трапеций. Так осцилляции на кривых остойчивости для сферических обводов (Рис. 1 – слева-внизу) фактически показывают качество вычислений с точностью порядка 4 мм, что можно полагать вполне допустимым для 10 метровой ширины корпуса. При взятии интегралов здесь не выполняется анализа сходимости функций, а точки с возможными разрывами подынтегральных величин, если этот не влияет на общую достоверность результатов, просто пропускаются, как это видно по графикам метацентрических радиусов r и R , которые при обычных условиях вблизи основной линии устремляются к бесконечности.

Основное качество корпуса в форме сферы и эллипсоида, так же как и в случае с цилиндром, это неизменность положения поперечного метацентра при любых углах крена и при любых изменениях осадки корпуса. На двух диаграммах остойчивости для нулевой начальной остойчивости $h=0$, и для малой метацентрической высоты $h=1$ см хорошо видно фактическое отсутствие восстанавливающих моментов формы корпуса, и так же как и независимость поведения этих кривых во всём диапазоне осадок. Формально это означает полное отсутствие внешних гидростатических сил при плавании на волнении любой интенсивности, если конечно на корпусе не будет выступающих частей, а трения о касательные составляющие обтекающих потоков можно считать пренебрежимо малыми.

Диаграммы остойчивости куба (Рис. 2) разделяются на четыре равномерные зоны с узлами пересечения всех кривых ровно через 45° . Нулевая начальная метацентрическая высота для куба соответствует снижению на 77 см аппликаты центра тяжести. Если центр масс приподнять до центра объема куба, то

куб накренится на 45°, выйдя в положение с диагональной шириной и максимальной площадью ватерлинии.

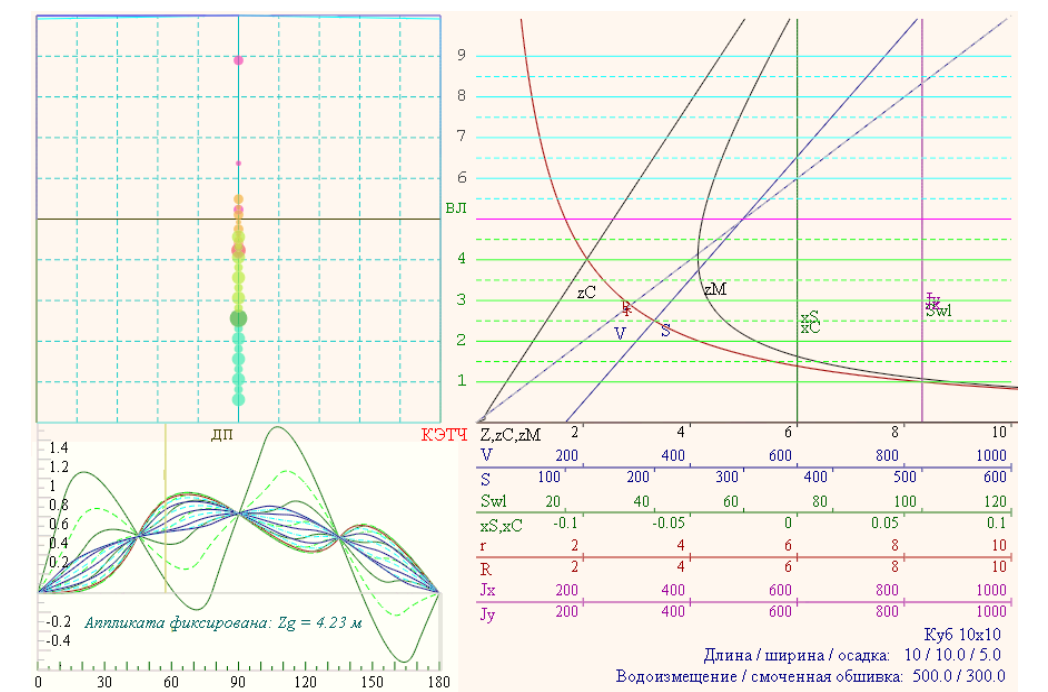


Рис. 2. Контуры корпуса куба (сверху-слева); и и его диаграммы остойчивости (слева-внизу) при фиксированном положении центра тяжести (Z_g) и нулевой начальной метacentрической высоте ($h=0$); справа гидростатические кривые элементов теоретического чертежа.

Важное замечание относительно влияния любого изменения осадки на обретение положительной величины метacentрической высоты, что как бы компенсирует снижение центра тяжести, возвращая плавающему кубу интегральную остойчивость с весьма большой метacentрической высотой в те же 77 см. Значит, можно уверенно полагать, что судно с вертикальными и прямостенными бортами должно обладать весьма высоким запасом остойчивости в измерениях площади под S-образной диаграммой даже при нулевой метacentрической высоте, если последнее, конечно, не будет испорчено обводами в оконечностях.

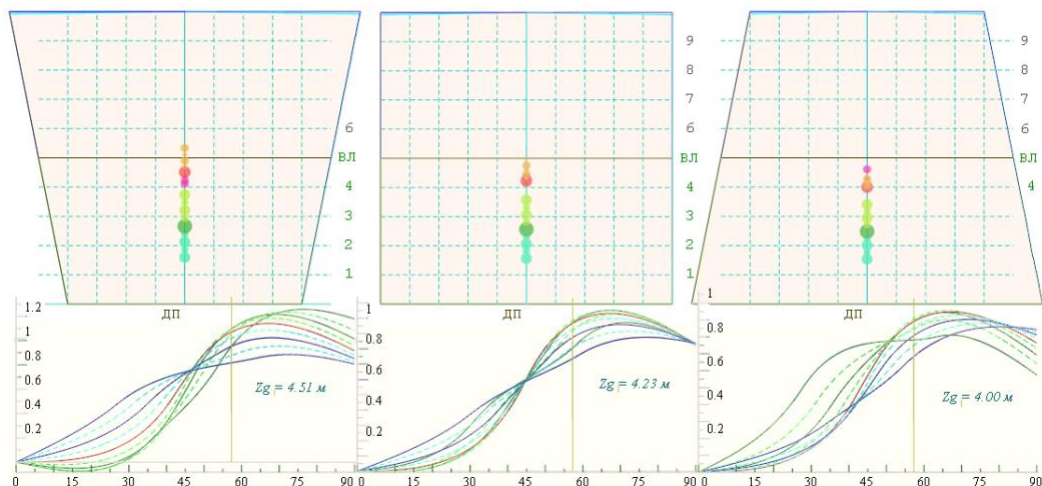


Рис. 3. Вариант расчетов остойчивости формы корпуса для развала борта – слева; вертикальных бортов – по центру; и завала бортов – справа. Диаграммы построены для фиксированного положения центра тяжести (Z_g) и нулевой начальной метацентрической высоты ($h=0$), и уменьшенного до 40% диапазона осадок 3÷4 – на всплытие, и 6÷7 ватерлиний – на погружение корпуса при вертикальной качке.

По диаграммам остойчивости делается вывод, что в случае развала борта на уровне действующей ватерлинии, остойчивость формы корпуса в условиях вертикальной качки ухудшается при всплытии над волнами, и возрастает при частичном погружении. В случае с завалом борта наоборот, остойчивость значительно улучшается при погружении корпуса, и также улучшается при погружении, но немного в меньшей степени. Вертикальный борт просто уменьшает разброс диаграмм остойчивости, по диаграммам остойчивости видно, что оптимум, аналогичный завалу борта достигается при аппликате центра тяжести строго на уровне ватерлинии, что в принципе соответствует динамике изменений метацентрического радиуса как отношения момента инерции площади ватерлинии к водоизмещению: $r = Jx/W$ [м]. Но тогда, наилучшим вариантом формы мидельшпангоута следует признать наличие небольшого завала борта с точкой перегиба на уровне действующей ватерлинии, чтобы при погружении корпуса уменьшить скорость спадания момента инерции ватерлинии при погружении корпуса в условиях вертикальной качки.

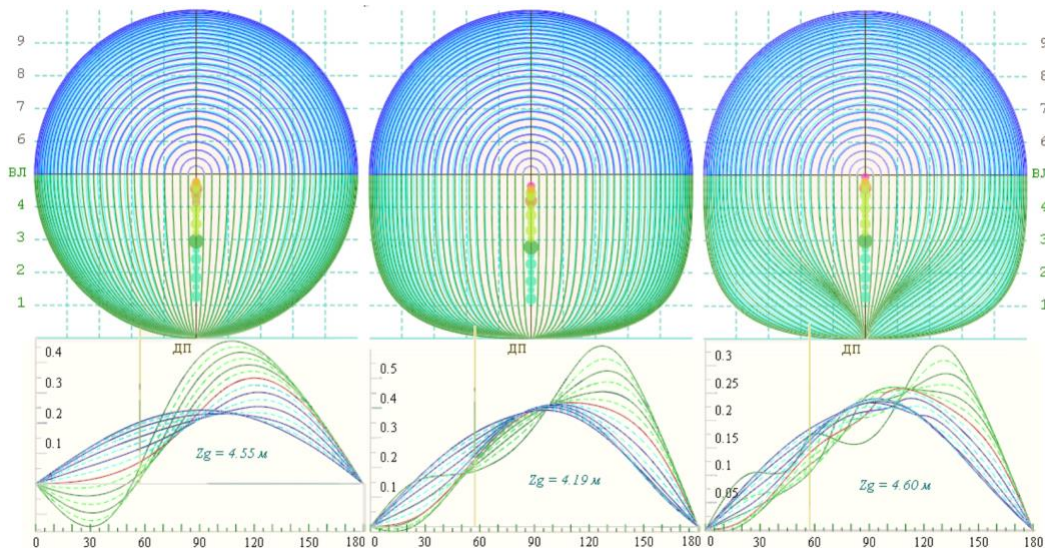


Рис. 4. Вариант расчетов остойчивости формы корпуса для цилиндрического корпуса – слева; корпуса кубической полноты со «струйной системой» обтекания по Алымову¹ – в центре; и тот же корпус со скуловыми гашением корабельных и внешних штормовых волн – справа. Диаграммы построены для фиксированного положения центра тяжести (Z_g) и нулевой начальной метацентрической высоты ($h=0$), и уменьшенного до 40% диапазона осадок 2÷4 – на всплытие, и 6÷9 ватерлиний на погружение корпуса в условиях вертикальной качки.

Возвращаясь к рассмотрению обводов корпуса, оставляем надводную часть эллиптической формы (Рис. 4), в этом случае она не будет привносить излишних деформаций в кривые диаграмм остойчивости.

Что получить приемлемые в практике обводы корпуса, можно вытянуть шпангоуты эллиптической формы до основной линии (Рис. 4, слева). Получаем, что у округлого корпуса сохраняется проблема ослабленной остойчивости формы ($h=0$) при всплытии корпуса над впадинами штормовых волн. Характерная форма корпуса подводных лодок в надводном положении в таком случае может способствовать усилению бортовой качки, при этом запас остойчивости можно считать абсолютным, а судно с таким корпусом принципиально не может быть опрокинуто кверху килем. Для формального устранения отрицательной начальной остойчивости на всех осадках от второй до 9 ватерлинии (всплытие 60%,

¹ Илья Павлович Алымов. Морской сборник, 1879: «Очерки системы струйного образования судов и исследование опыта применения системы», №9, с.1÷54, №10, с.1÷52.; «Опыт фактического применения системы струйных образований судов», №12, с.103÷156.

погружение 80%), достаточно установить метацентрическую высоту порядка 36 см.

На среднем чертеже в проекции корпус увеличена общая полнота с помощью кубического произведения, отчего кроме значительного увеличения полезного водоизмещения, на диаграммах остойчивости отмечается улучшение запаса остойчивости в штормовом плавании, включая практически весь видимый диапазон подвсплытия корпуса между гребнями штормовых волн. По аналогии с вертикальными прямостенными бортами на диаграммах остойчивости просматривается оптимум осадки на уровне положения метacentра на 80 см ниже конструктивной ватерлинии, что вполне компенсируется увеличением начальной метацентрической высоты на 9 см. до полного исключения малой начальной отрицательной остойчивости при штормовом подвсплытии корпуса.

Образованные кубическим увеличением полноты аналитические обводы корпуса, соответствуют тривиальной математической модели типа «системы струйного образования» по И. П. Алымову, плохо сказывающейся на ходкости, вертикальной и продольной качке корабля в штормовом плавании. Решение проблемы обеспечивается построением скуловых обводов в оконечностях с заострёнными книзу V-образными или клиперскими скуловыми шпангоутами (Рис. 4, справа). В клиперских обводах еще немного улучшается проявление плеч восстанавливающие моменты при подвсплытии корпуса, и теперь для исключения остаточного неположительного фрагмента достаточно 1 см метацентрической высоты.

Все три варианта аналитического представления округлых корабельных обводов обладают абсолютным запасом остойчивости на любых углах крена, с несущественными оговорками по переменным посадкам. Диаграммы остойчивости формы округлого корпуса ($h=0$) показывают принципиальную невозможность опрокидывания корабля ввиду малоподвижности аппликаты метacentра.

Проведенный поиск оптимальной формы корпуса предопределяется в качестве особого или исходного этапа непротиворечивого проектирования обводов и общекорабельной архитектуры всепогодного корабля. В морской практике общearchитектурные решения должны в большей мере отвечать предназначению корабля. В давние исторические времена основное правило задавалось афоризмом о «красивом корабле, на борту которого не должно быть ничего лишнего».

Выполняем сопоставление наилучших исторических проектных решений с современным видением инженерных заключений в области целевого проектирования корабля условно широкого предназначения. Современное искусство проектирования корабля безмерно разнообразно вариантами обводов, с множеством противоречивых общеархитектурных представлений по обличению кораблей и гражданских судов, что формально предполагает существование некоего диалектического процесса по вопросам хорошей морской практики, с дискуссиями об эстетических воззрениях по «красивому» кораблю – единственной предпосылки к разнообразию. Эстетические концепции в теории корабля вполне уместны, но лишь для флота ограниченного района плавания и по заведомо тихой воде, например для озерно-речного флота с ограничениями по осадке; или для быстроходных кораблей охраны водного района, способных заблаговременно уходить в убежища при неожиданных штормовых проявлениях и прогнозах плохой погоды.

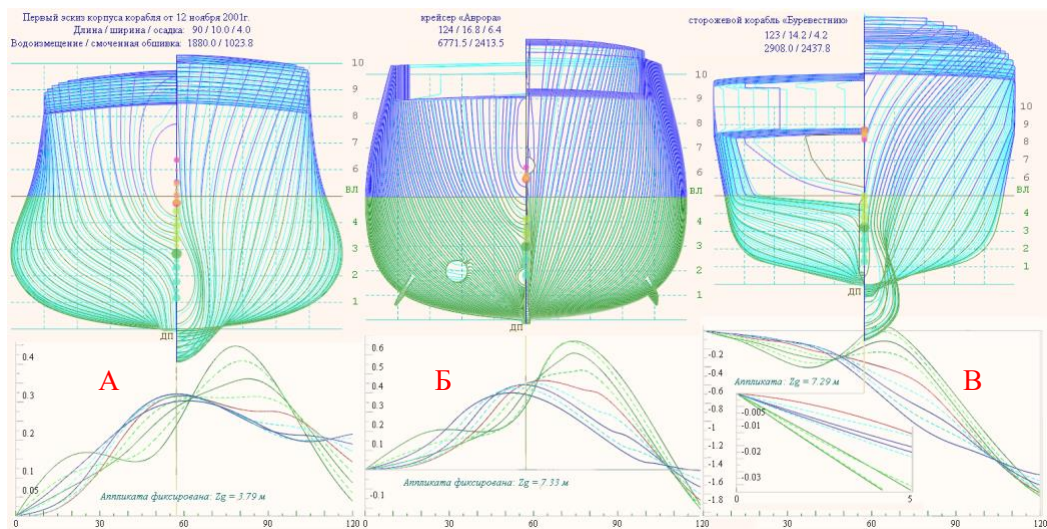


Рис. 5. Сверху изображены три варианта проекции корпус для теоретических чертежей с диаграммами остойчивости формы корпуса кораблей, ниже, для различных осадок при фиксированных положениях центра тяжести (Z_g) и нулевой начальной метacentрической высоте ($h=0$): **А**–«Корвет» – корабль повышенной штормовой мореходности; **Б**–«Аврора» – исторический прототип корабля, как образец морской грамотности и хорошей морской практики в проектировании корабельных обводов; **В**–«Буревестник» – современный корабль с традиционным сильным развалом борта и развесистыми ветвями надводных шпангоутов. Красная кривая на диаграммах остойчивости соответствует конструктивной осадке [ВЛ], зеленые по ватерлиниям [3÷4] – при всплытии, и синие [6÷7] – при погружении в динамическом процессе в условиях вертикальной качки.

Показателен беглый анализ мореходных качеств корабельных обводов с использованием наглядных иллюстраций, с пояснениями расширенных гидродинамических качеств корпуса в современном, историческом и перспективном видении проблемы непротиворечивого проектирования всепогодного корабля.

Особенности формы и распределения площадей под кривыми на диаграммах остойчивости для различных осадок (Рис. 5) характеризуют запас остойчивости в качестве весьма важных характеристики корабельных обводов и формы корпуса в целом. На чертежах корпуса и диаграммах Рида для трёх кораблей приводятся особенности изменения остойчивости в походном состоянии, с фиксированным положением аппликаты центра тяжести, что определяет возможность оценок запасов остойчивости формы корпуса при динамически изменяющейся в штормовом плавании осадке.

Безусловно, в реальной морской практике относительно остойчивости формы корпуса ($h=0$) к нулевой метацентрической высоте добавляется небольшое смещение центра тяжести вниз от нейтрального положения, относительно приведённых выше диаграмм остойчивости на примерах с тремя кораблями. Так для крейсера «Аврора» эксплуатационная величина метацентрической высоты, судя по историческим источникам² составляла $h=80$ см, и период бортовой качки порядка 17 секунд, с максимальным восстанавливающим плечом $l=1,08$ м, возникающем под углом крена $\vartheta=72^\circ$, и вовсе без угла заката диаграммы, что можно назвать абсолютной остойчивостью. Период штормовых волн в 17 секунд не характерен даже для океанских акваторий, разве что для длиннопериодной зыби с пологими склонами, следующей из удаленных акваторий с ураганными ветрами. И потому, кроме условно комфортного обитания на борту «Авроры», перед командиром корабля не стояло проблем выбора курса и скорости хода в условиях штормового волнения любой интенсивности, при полной готовности к использованию по назначению содержались все бортовые устройства, механизмы и вооружения.

Для «Буревестника» метацентрическая высота поддерживается на уровнях не менее 1,5 – 2,5 метров, что соответствует бортовой качке от 10,5 до 8 секунд, максимальным плечом остойчивости 0,82 и 1,75 на углах крена 70° и 75° , с углами заката на диаграммах Рида в 101° и 127° , соответственно. Выпуклость диаграммы остойчивости «Буревестника» заметно снижает максимальные плечи

² Костенко В.П. На «Орле» в Цусиме. Л.: Судостроение, 1968. 525 с.

остойчивости, в то же время как S-образная вогнутость диаграмм для «Авроры» - повышает устойчивость на больших углах крена. Свойственные этому кораблю факторы недостаточной мореходности будут наличествовать и по части его гидромеханики в условиях морского волнения, усиливаемые наличием бортовых килей с большекрылыми активными успокоителями качки.

Вопрос: стоило ли так сильно раскачивать «Буревестник» большим рычагом метацентрической высоты, с ухудшением общих показателей устойчивости и мореходности, если результат получается вовсе не лучше чем у «Авроры» без одного «рычага»?

Отличной особенностью устойчивости перспективного корабля А-«Корвет» отмечается быстрое восстановление положительной величины метацентрической высоты и действующих плеч устойчивости при любых изменениях посадки или накренения корпуса. Точно такой же эффект, но менее выраженный, наблюдается у крейсера Б-«Аврора», что можно признать неким чудесным провидением или особой морской грамотностью старшего кораблестроителя крейсера Саверия Ксаверьевича Ратника, 1895 год. Запас устойчивости по оценкам максимальных плеч устойчивости на больших углах крена у А-«Корвета» и Б-«Авроры» практически одинаковы, если их рассматривать в пропорциях от ширины корпуса, в то же время, А-«Корвету» свойственно большее проявление начальной устойчивости при изменениях осадки с быстрый рост плеч устойчивости по более ярко-выраженным S-образным вогнутостям диаграмм устойчивости, что обеспечивается максимальным завалом борта на уровне действующей ватерлинии с характерной точкой перегиба на шпангоутных контурах в средней части корпуса. У «Буревестника» S-образного запаса устойчивости для тихой воды нет вовсе, и при снижении до нуля начальной устойчивости корабль рискует опрокинуться кверху килем без видимых предостережений.

Можно предполагать, что подтверждается в опытовых экспериментах с «Корветом» на интенсивном волнении, что и «Авроре» позволительно и безопасно гасить размах бортовой качки за счёт увеличения собственных периодов качки корабля путём уменьшения или обнуления метацентрической высоты. Возникновение отрицательной устойчивости формы корпуса при S-образных диаграммах будет обнаруживаться постоянным или длительным накренением попеременно на один из бортов корабля, что технически устраняется небольшим понижением действующего центра тяжести, например перекачкой жидкостей из верхних танков в нижние, или приемом балласта.

Совсем иначе всецелое сваливание величин плеч статической остойчивости в отрицательную зону для сторожевого корабля (Рис. 5-В-«Буревестник») объясняется, по-видимому, положением конструктивной ватерлинии прямо под плоской поверхностью широкого транцевого кормового подзора. На врезке в диаграмме остойчивости приведен фрагмент для первых пяти градусов крена, где видна выпуклость диаграммы остойчивости на конструктивной посадке (красная кривая), и где любое отклонения от конструктивной ватерлинии приводят остойчивость в зону отрицательных метацентрических высот, к полной потере остойчивости корабля как по крену, так и по любым изменениям осадки. Следует заметить, что традиционные оценки остойчивости с помощью кренования, или по замерам периодов собственной качки на относительно малых углах крена, будут завышать реальную остойчивость корабля, а ввиду сильно отрицательного «запаса остойчивости» командиру корабля должно будет непременно контролировать и поддерживать начальную остойчивость и метацентрическую высоту на весьма высоком положительном уровне, тем самым усугубляя резкую и с большими размахами бортовую качку даже на относительно слабом или умеренном волнении (*проблема качки ледоколов*).

Увеличение начальной метацентрической высоты, определяемой в морской практике в качестве «рычага», за который волны раскачивают корабль, всегда откликается уменьшением собственных периодов бортовой качки корабля, что на ходу корабля может откликаться резонансными явлениями в силовом взаимодействии с морским волнением. Во избежание опасности в штормовом плавании командиру корабля придётся заблаговременно уходить с заданного курса и в режим штормования «носом на волну»³ предельно малыми ходами, что единственно допустимо для кораблей с развесистыми надводными ветвями носовых шпангоутов и широким транцевым подзором в корме.

Обычно широкая транцевая корма, консолью нависающая над поверхностью воды, проявляется S-образностью диаграммы остойчивости на тихой воде. На морском волнении такое свойство диаграмм остойчивости весьма обманчиво. Консоль транцевой кормы усиливает килевую и бортовую качку, с

³ На штормовом курсе носом на волну, с гигантским развалом надводных ветвей шпангоутов и подводным бульбом в носовой оконечности «Буревестника», во избежание ударных нагрузок требуется держать самый малый ход на пределе управляемости. При отклонение от курса на $1\div 2$ румба ($15\div 20^\circ$) возможны мощные удары скулового слеминга.

проявлениями сильных ударов волн в кормовой оконечности, особенно на курсе по волне.

В предварительных заключениях попробуем вкратце проанализировать наметившиеся концептуальные предпосылки к предопределению мореходных качеств корабля с помощью построения обводов, надводного борта и успокоителей качки в средней части корпуса.

Предварительные заключения по штормовой остойчивости и гидродинамике корабля

Задолго до создания вычислительных экспериментов для выполнения настоящей работы, по инициативе наставников Калининградского мореходного училища, где 1975 году проводились первые опытовые эксперименты с оптимизированными обводами корабля повышенной штормовой мореходности, и впоследствии, в 1985 году в ходе дипломных изысканий на базе мореходного опытового бассейна кафедры теории корабля Ленинградского кораблестроительного института, отчасти были отработаны ключевые концепции построения корабельных обводов и общекорабельной архитектуры в согласии с настоящими целевыми показателями непротиворечивого проектирования корабля повышенной штормовой мореходности.

Корабельные исследования без задействования современной вычислительной техники строились на основе опытовых экспериментов с моделями кораблей, с последующими теоретическими обоснованиями гидромеханики качки и ходкости на основе гидростатических формализаций давления воды на смоченной обшивке корабля с вовлечением гидродинамических уравнений для кинематики потоков по Бернулли. Аналогичный анализ гидромеханики корпуса, руля и движителей является основой морской грамотности и хорошей практики в моменты быстрых принятий решений по маневрированию корабля в сложных условиях плавания, при прохождении узкостей, на швартовках в открытом море или у причала, с учетом ветров и течений. Концепция целевого проектирования корабля строится на принципах непротивления, как пропуск через корпус корабля или взаимокompенсации силовых воздействий со стороны штормовых волн и ураганных ветров.

Такой своеобразный комплексный подход образовал оригинальность и новизну запатентованных в России инженерных решений по достижению наилучших мореходных качеств как для обобщенных проектов корабельных

обводов, так и конкретных кораблей и судов океанского плавания, включая необходимые усовершенствования двигателей для компенсации оптимизационных потерь.

По мере рассмотрения результатов вычислительных экспериментов будет уместно возвращаться к ранее патентованным проектным решениям, которые, конечно же, создают техническую основу в постановках задач по достижению требуемых мореходных качеств корабля. По времени подачи заявки на изобретения последовательно представлялись в Роспатент, как по степени их важности, так и по мере необходимости дополнительных обоснований все более тонких качеств корабельных обводов в сочетании с общеархитектурными особенностями корабля.

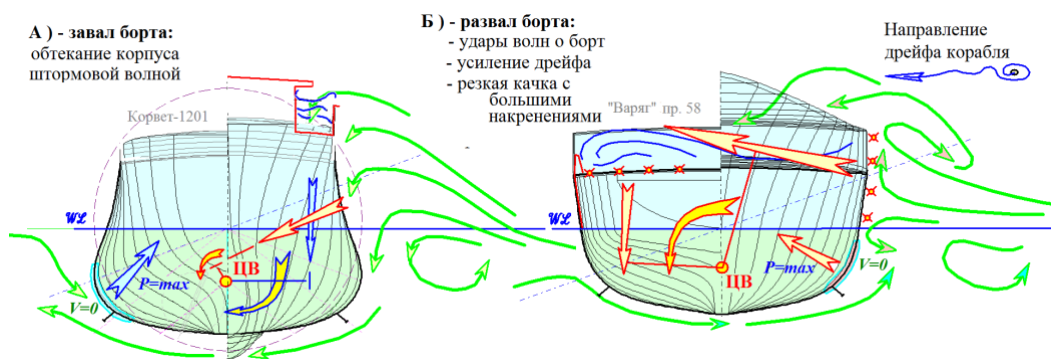


Рис. 6. Характер гидродинамического воздействия морского волнения на корпус корабля показывает различия в перераспределении кренящих гидродинамических сил А) – перспективного, слева, и Б) – современного, справа кораблей. Кренящий момент от прямого воздействия волнового гребня на надводный борт компенсируется завалом борта, а длинная вдолькорпусная надстройка на верхней палубе и бортовые кили способствуют компенсации остаточного кренящего момента. В случае развала бортов все кили и распределение давлений в подводной части корпуса усиливают кренящий момент под воздействием морского волнения, а возникающий дрейф усугубляет лишь негативный эффект. В целом, по схеме А) достигается полная компенсация кренящих моментов, по схеме Б) – все внешние силы действуют в сторону образования крена на подветренный борт.

Первый патент 2007 года № 2360827 «Корабль без бортовой качки на волнении»⁴ определял особенности формы корпуса корабля, способствующие взаимокомпенсации внешних сил волновой природы при всестороннем

⁴ «Корабль без бортовой качки на волнении». Патент № 2360827 от 2009.07.10. Бюл. № 19. Пер.№ 2007133623, от 2007.09.07., вх.№ 036720. ShipDesign.ru/Invent/01.html

воздействии на корпус и палубы корабля. Небольшое уточнение проектных решений выполнено в 2013 году, по результатам серии мореходных испытаний телеуправляемых моделей судов, и зафиксирован патентом России⁵ «Корабль, устойчивый в штормовом плавании».

Современный корабль (Рис. 6, справа) с сильным развалом борта практически полностью отражает набегающую на борт волну, при этом с подветренного борта наблюдается фактически тихая вода. При этом на наветренном борту проявляется сильнейшая интерференция между набегающими и отраженными от борта корабля свежими или штормовыми волнами, тем самым наглядно показывая механизм образования интенсивной бортовой качки. В гидромеханике взаимодействия это свидетельствует о полном силовом восприятии многотонного импульса из быстрого гребня волны, с образованием безреакционной кренящей пары по надводному борту с упором на центр подводного бокового сопротивления, и с образованием сильного бокового дрейфа, превращающего бортовые и днищевые кили в паразитные выступающие части.

Корпус корабля с завалом борта (Рис. 6, слева) подтормаживает штормовую волну на уровне подошвы, создавая гидродинамические условия для затягивания трохоидального вихря под днище корабля, одновременно перенаправляя вниз вектор суммарного действия волновых сил. В эксперименте наблюдается чистый проход волны сквозь корпус корабля без видимых трансформаций, а вместо интерференции с отражаемыми волнами наветренного борта, иногда проявляется обрушение гребней на небольшом удалении от борта подветренного, что следует из малозаметной встречной дифракции волновых гребней после обхода корпуса корабля.

Интенсивный поток воды из волнового гребня под корпусом корабля приводит к перераспределению гидродинамических давлений, и в случае относительно слабого дрейфа отметка нулевой (критической) скорости смещается на подветренный борт, также образуя контур повышенного давления на компенсацию прямого воздействия волн. И только затягивание волнового потока под днище корабля создает положительный эффект на бортовых килях. Поток под днищем оптимизированного корпуса (Рис. 6, слева) может остановиться, к примеру, у подветренного борта, оставляя за этим бортовым килём только вязкое

⁵ «Корабль, устойчивый в штормовом плавании». Храмушин В. Н. Патент № 2487043 (СахГУ). Бюл. № 2. от 20 января 2013 г. Рег.№ 2011129192, от 12.07.2011 г. (составлено 2011-01-17, решение о выдаче патента от 2012-11-01). ShipDesign.ru/Invent/06.html

сопротивление ходкости корабля. Тогда кили на днище и с противоположного послужат слабой компенсации качки, а иначе, если скорость дрейфа сильнее потока воды под днищем, то все кили и другие подводные выступающие части корпуса служат только опасному усилению углов крена при бортовой качке.

Своеобразным надводным успокоителем качки служит палуба между фальшбортом и длинной надстройкой, где могут временно удерживаться большие объемы воды из падающих гребней волн, что также способствует умерению бортовой качки, в отличие от сплошной палубы, на которой потоки воды перекачиваются на подветренный борт в усиление крена.

Завал и вогнутость борта в средней части корпуса образуют усиленную S-образность диаграмм остойчивости, что создаёт возможность и востребует для контроля остойчивости корабля по факту обнаружения затянувшихся по времени накрений. При благополучном проектировании корабельных обводов с необходимой отработкой геометрии надводного борта, корабль обретает абсолютную остойчивость и плавную бортовую качку с относительно малыми углами крена на любых скоростях хода произвольными курсами относительно штормового волнения и ветра.

В случае развала бортов мореплаватели должны искусственно создавать и контролировать поддержание резкой качки с большим размахом углов крена, что достигается завышением метацентрической высоты – большого рычага для сильных воздействий на склонах крупных волн. Величина метацентрической высоты для корабля с развалом бортов будет регулироваться углами заката диаграммы остойчивости, и для достижения таких ограничений порядка 60° метацентрическая высота будет превышать $1,5 \div 2,5$ метра. При характерных корабельных размерениях периоды собственных колебаний корпуса будут сводится к свойственным для морских районов периодам штормовых волн порядка $6 \div 10$ секунд. Возникает опасность опрокидывания корабля на резонансных углах крена в условиях ограниченных углов заката диаграмм остойчивости, присущих развесистым ветвях шпангоутов. Попутно корабль лишается основного предназначения, так как на свежем волнении придётся вынужденно уходить с заданного маршрута в режим штормования носом на волну с предельно малыми скоростями хода.

В проведении мореходных испытаний с моделями со специально отработанными обводами, на фоне малых углов крена у опытовой модели начинает хорошо проявляться динамика вертикальной качки, собственные периоды которой эмпирически оцениваются аналогами капитанской формулы как

$\tau_{\zeta} \approx 2,5 \cdot \sqrt{T}$ [сек], где T [м] – осадка, и эти периоды соразмерны килевой качке $\tau_{\psi} \approx 2,4 \cdot \sqrt{T}$ [сек], что обычно меньше периодов штормовых волн, и так же как в случае с килевой качкой не исключаются резонансные проявления в движении корабля относительно встречных гребней штормового волнения.

Заметное проявление вертикальной качки требует решения задачи о сохранении остойчивости при значительных изменениях посадки корпуса, вплоть от возможности его отрыва от поверхности воды до погружения под воду со всеми верхними палубами. Ключевые инженерные предпосылки для решения этой проблемы представлено Патентом № 2487043 «Корабль, остойчивый в штормовом плавании»⁶, где систематизированы вышеприведённые заключения о наилучшем варианте формы мидельшпангоута с точкой перегиба и небольшим завалом борта на уровне конструктивной (действующей) ватерлинии, с упоминанием предпочтительном устройстве заострённой кормовой оконечности выше ватерлинии, или – в виде крейсерской кормы.

Экспериментально все технические решения многократно проверялись с различными малыми моделями судов в периоды работы на море в Калининграде, в Севастополе и во Владивостоке, где в основном отрабатывались технические решения по ходкости, килевой и бортовой качке. Заключительным подтверждением возможности практически полного исключения бортовой качки⁷ в опытовом бассейне Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Соответственно, в вышеозначенных патентах представлена и обоснована расширенная гидродинамическая трактовка остойчивости корабля на интенсивном морском волнении (Рис. 6), когда гидростатические силы и моменты корректируются перепадами давлений под действием быстрых потоков воды вблизи смоченной бортовой обшивки корабля.

В целевом проектировании корабля возникают существенно различающиеся требования по предназначению и мореходным качествам корабля. В дополнение к схемам формирования средней части корпуса корабля,

⁶ «Корабль, остойчивый в штормовом плавании». Патент № 2487043 (СахГУ). Бюл. № 2 от 2013.01.20. Рег. № 2011129192, от 2011.07.12. ShipDesign.ru/Invent/06.html

⁷ ShipDesign.ru/Invent/2003-11-01_Ship_with_small_rolling_on_heavy_waves_in_towing_tank.mp4 Гидродинамическая компенсация бортовой качки корабля на крупном волнении. *Корабль маневрирует малыми ходами или штормует без хода в моменты приведения на новый курс относительно регулярного волнения в опытовом бассейне (совершенно неожиданное достижение полной компенсации бортовой качки для всех режимов плавания в условиях предельно крупного волнения). 21,5 Мб.*

рассмотрим и проанализируем три различающихся примера обводов и корпуса корабля в целом:

1) – «Early-1987» – вариант оптимального построения корабельных обводов для штормового плавания, построенного по результатам комплекса опытовых мореходных испытаний в 1985-1986 годах.

2) – «Г5-катер А.Н.Туполева, 1928» – корпус особо специализированного высокоскоростного глиссирующего корабля, обводы которого должны приподнимать корпус над водой для скольжений с минимальным волнообразованием;

3) – «ONRT-5613 Tumblehome Ship» – внешне адекватного, но на поверку не особо корректного согласования геометрических построений обводов и формы корпуса корабля в целом.

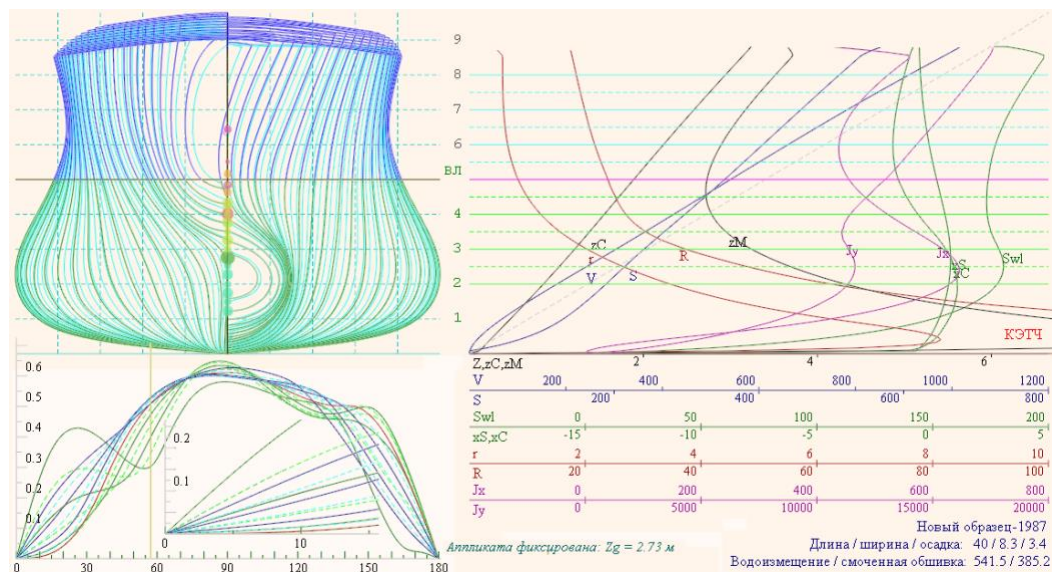


Рис. 7. 1) – гидростатические характеристики корпуса корабля, построенного по результатам обобщения серии мореходных экспериментов в опытовом бассейне кафедры теории корабля Ленинградского кораблестроительного института в 1985 году.

Корпус корабля (Рис. 7) с шифром «Early-1987» строился в качестве компромиссной модели по результатам испытания гиперболизированного проекта корабля «МИДВ-1985», планом испытаний которого предусматривалось изучение ходкости и качки на волнении в самом широком диапазоне осадок, отчего практически все ватерлинии в оконечностях проводились по возможности эквидистантно одна к другой.

Доработка проекта «Early-1987» велась с целью минимизации корабельного волнообразования на средних скоростях с числами Фруда порядка $0,35 \div 0,45$, так как в ходовых испытаниях «МИДВ-1985» на указанных скоростях наблюдался чётко выраженный гребень расходящейся корабельной волны. С этой целью в оконечностях устроены поверхности плавного закручивания набегающего потока от форштевня под днище, что означает формирование клиперских обводов в носовой и кормовой оконечностях. Задача ходкости и минимизации всех видов качки успешно достигнута, о чем будет многократно упоминаться в гидродинамических следующих разделах работы. Однако, в согласии с концепцией непротиворечивого проектирования, обновленный корпус стал обладать прекрасными гидростатическими качествами и остойчивостью формы ($h=0$) в широких диапазонах осадок и углов крена – углов склона набегающих штормовых волн.

На диаграммах остойчивости формы ($h=0$) корпуса «Early-1987» ярко выражается минимальность восстанавливающего плеча на конструктивной осадке до углов крена порядка 20° , но при любом изменении посадки, например на волновых склонах, быстро восстанавливается положительная поперечная остойчивость. На врезке внутри диаграмм остойчивости (Рис. 7) показаны начальные 15° градусов крена в увеличенном масштабе, и где хорошо видно, что нулевая остойчивость поддерживается только для конструктивной осадки, и при любом её изменении метацентрическая высота быстро возрастает до величины порядка $0,5$ м. В экспериментах с моделями с аналогичной геометрией корпуса на открытых морских акваториях с относительно крупным ветровым волнением, на вертикальной качке интегрально возрастающей метацентрической вполне хватает для компенсации кренящего действия ветра на борт и надстройки корабля. Максимальное плечо восстанавливающего момента при нулевой начальной метацентрической высоте измеряется величиной порядка 70 см, этого более чем достаточно для невеликого судна с длиной корпуса всего 40 м.

Быстроходный торпедный катер Г-5 создавался в Центральном аэрогидродинамическом институте имени профессора Николая Егоровича Жуковского (ЦАГИ) под руководством авиаконструктора Александра Николаевича Туполева. Безусловно, мореходность быстроходного глиссирующего катера (Рис. 8) должна оцениваться из гидродинамических принципов. Для катера Г-5 в гидродинамике все благополучно, он легко встает на редан и при циркуляции на огромных скоростях более 50 узлов ($Fn \approx 2$) не проявляется

опасности опрокидывания, хотя удары волн о плоское днище за реданом достигают предельных величин с интенсивной вибрацией всего корпуса.

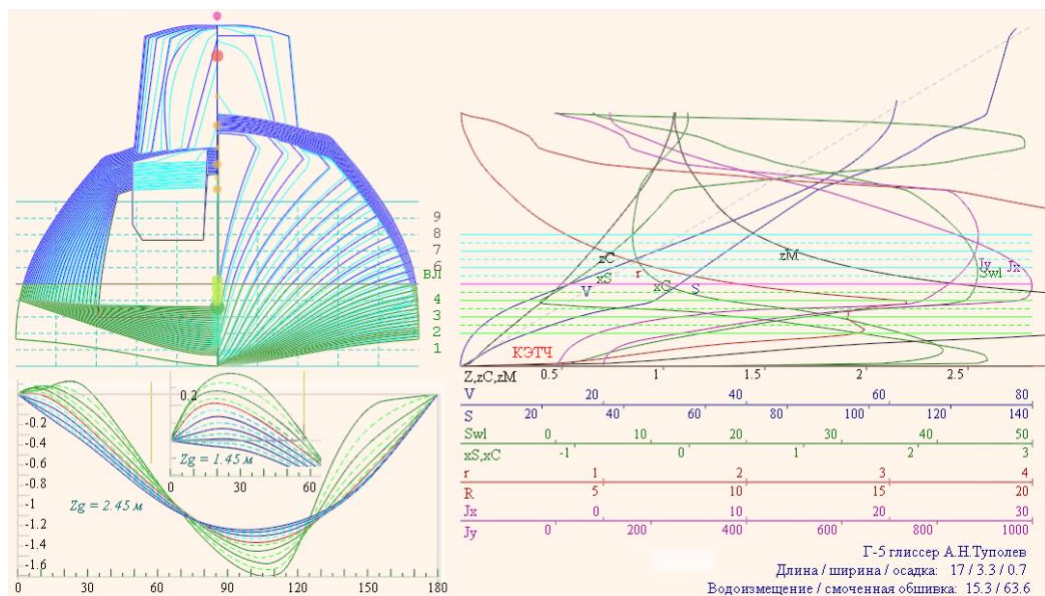


Рис. 8. 2) - остойчивость формы и кривые элементов теоретического чертежа (КЭТЧ) торпедного катера типа «Г-5» проекта ЦАГИ 1928 года.

Гидростатической остойчивостью формы ($h=0$) катер Г-5 не обладает. На врезке в диаграммах остойчивости приведен фрагмент тех же диаграмм для начальной метацентрической высоты $h=1$ м. Угол заката получается порядка 50° , максимальное плечо восстанавливающего момента $l_{max}=40$ см, и такое снижение в сравнении с $h=1$ м получается ввиду сильной выпуклости рабочей диаграммы остойчивости.

Столь ненадежная остойчивость свойственна широким речным судам с малой осадкой и низким надводным бортом. Для катера «Г-5» такое свойство малой остойчивости также объясняется относительно малой осадкой, при этом, как уже показывалось ранее (Рис. 4), покатый и округлый надводный борт катера практически не влияет на графики диаграмм остойчивости.

Совсем неожиданно негативные оценки запаса остойчивости получаются в отношении экспериментальной модели «ONR-6513 Tumblehome ship» (Рис. 9), широко вовлеченной в отработку вопросов мореходности корабля на

международных научных форумах⁸ кораблестроителей. В противоположность сделанным выше заключениям (Рис. 5) о предпочтительной вогнутости, или хотя бы спрямлении контуров шпангоутов на уровне действующей ватерлинии в средней части корпуса, у модели «ONR-5613» шпангоуты не просто не вогнутые, а имеют заметный слом по выпуклости с образованием максимальной ширины и момента инерции площади точно на конструктивной ватерлинии.

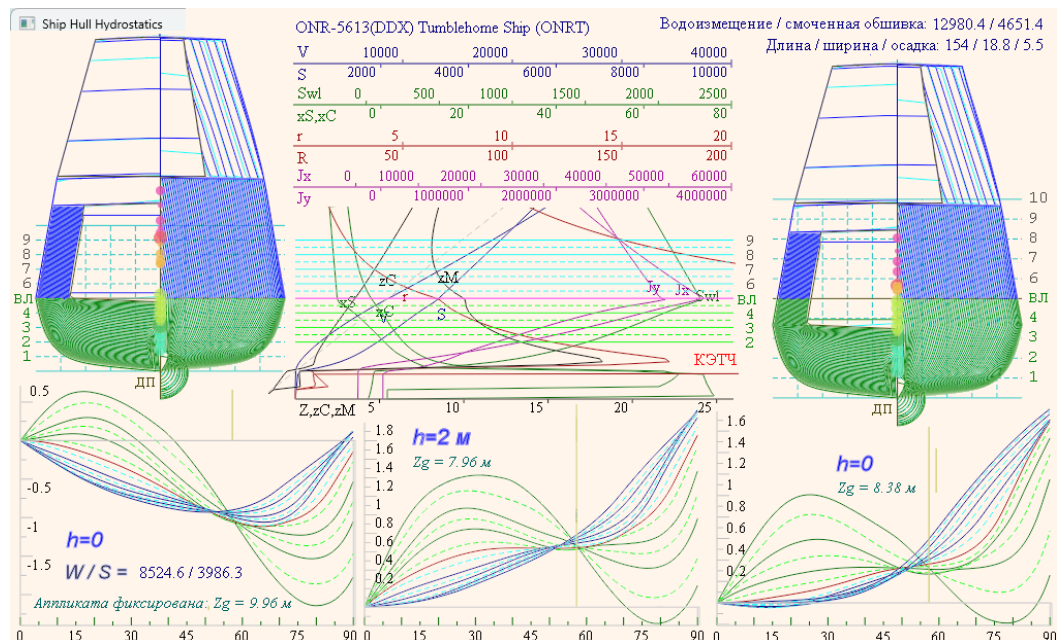


Рис. 9. 3) – гидростатические характеристики и диаграммы остойчивости предварительного проекта современного корабля «ONR-5613 Tumblehome ship». Левый чертеж корпуса по конструктивной осадке, ниже под ним диаграммы остойчивости формы корпуса $h = 0$, правее по центру те же диаграммы с фиксированием центра тяжести корабля на два метра ниже: $h = 2$ м. Справа тот же корабль с осадкой на два метра большей, с диаграммами остойчивости формы корпуса $h = 0$.

На гидростатических кривых образуются острые сломы на Jx – поперечном и Jy – продольном моментах инерции площадей ватерлиний, собственно и площадь самой ватерлинии сламывается под острым углом, что, видимо, усиливается широкой консолью транцевой кормы непосредственно на

⁸ ONR 5613 Tumblehome Ship (ONRT), preliminary design of a modern surface combatant, Tokyo 2015 A Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics, t2015.nmri.go.jp/onrt.html
Wageningen 2023: a Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics, w2022.nl/download/onrt/

уровне конструктивной ватерлинии. Получается также, что как и у «Буревестника» диаграмма остойчивости более выгнута на малых углах крена, отчего максимальное плечо восстанавливающего момента снижается до $L_{max} \approx 0,5$ м, вчетверо меньше начальной метацентрической высоты $h = 2$ м.

Вся кормовая часть корабля имеет одинаково плоское днище, без скулового перехода для выравнивания потока в зоне движителей и за кормой корабля. При подвсплытии включается небольшой фрагмент положительной начальной остойчивости, что объясняется быстрым уменьшением водоизмещения по выходу из воды транцевой кормы с почти плоским подзором. Ожидаемой обманки с S-образностью диаграммы начальной остойчивости за счет широкого транца не наблюдается, что лишь усугубляет негативные особенности корпуса по ударным нагрузкам – кормовому слемингу на ходу по волне, с опасными штормовыми захватами широкой кормы гребнями волн.

Если у оптимизируемых обводов корпуса завал борта сказывается на снижении максимального восстанавливающего момента, компенсируемого большим или абсолютным запасом остойчивости на больших углах крена. В случае модели «ONR-6513 Tumblehome ship» простой завал борта выше ватерлинии точно также снижает величину максимального момента остойчивости, но у него, подобно мелкосидящему с низким надводным бортом речному пароходу, срезается угол заката диаграммы остойчивости, что даже в случае безмерно высокой начальной метацентрической высоты привносит опасность опрокидывания в условиях резонансного размаха бортовой качки.

Корабельное волнообразование – отражение штормовых волн от корпуса корабля

Выше, для средней части корпуса корабля проводились обоснования к использованию завала борта с перегибом контуров шпангоутов на уровне действующей ватерлинии, что воспроизводило сопутствующее уменьшение ширины B [м] и поперечного момента инерции J_x [м⁴] площади действующей ватерлинии. В качестве исходной геометрической предпосылки уместно полагать, что аналогичная концепция по уменьшению продольного момента инерции площади действующей ватерлинии поспособствует умерению килевой качки корабля на крупном штормовом волнении. Однако, на практике такой геометрический эффект становится положительным при весьма непростых

доработках. Периоды собственной килевой $\tau_{\psi} \approx 2,4 \cdot \sqrt{T}$ [сек] и вертикальной $\tau_{\zeta} \approx 2,5 \cdot \sqrt{T}$ [сек] качки корабля, где T [м] – осадка, не особо велики. Это означает существование достижимой скорости хода относительно гребней и видимых фронтов штормовых волн, при которых резонансные явления неизбежны.

Силы сопротивления движению корабля под действием корабельного волнообразования описываются в точности теми же волновыми уравнениями, что и отражение штормовых волн от корпуса. Это означает, что снижение интенсивности корабельного волнообразования в области носовой скулы, по всем фазовым скоростям (и длинам) излучаемых волн, соизмеримых по характеристикам с внешними штормовыми волнами, можно ожидать аналогичного снижения силового воздействия штормового волнения на корпус корабля, в том числе во избежание ударных нагрузок при встрече корабля с гребнями волн предельно большой высоты.

Скуловые обводы в кормовой оконечности формируются с учётом дополнительных гидромеханических особенностей. В перенаправлении потока воды из под днища в зону кормового подзора требуется предотвращение отрыва от борта расходящейся корабельной волны, с попутной взаимокомпенсацией спутных скуловых вихрей для выравнивания потока в зоне действия рулей и движителей. Формирование обводов для кормового подзора и раковины кормовой оконечности должно допускать оптимальное увеличение полноты надводных ветвей шпангоутов для удержания рулей и движителей на одном уровне относительно поверхности и склонов крупных морских волн, во избежание их оголения в процессе килевой и вертикальной качки корабля.

С некоторыми оговорками, обе гидромеханические задачи разрешаются в процессе кинематической интерпретации корабельного волнообразования, отчасти путем локального изменения обводов с целью выравнивания интенсивности корабельного волнообразования вдоль корпуса корабля, и в целом добиваясь минимизации волнового сопротивления на всех скоростях хода. В начальном приближении это формирование V-образных шпангоутов как по носовой, так и по кормовой скуле, что наилучшим образом следует из интерпретации интенсивности излучения корабельных волн в зонах преодоления скоростного порога и отрыва (затягивания) корабельной волны в оконечностях корпуса.

Безусловно, обводы корабля должны предотвращать возникновение ходового дифферента, также как и любого ходового изменения посадки

водоизмещающего корпуса, что также является полезным условием взаимокомпенсации гидродинамических сил вдоль корпуса корабля, **исключающих сопротивление** формы корпуса корабля, связанного с асимметричным действием этих сил и дифференцирующих моментов.

Обобщенно, при формировании геометрической концепции корабельных обводов всегда необходимо следовать условиям взаимокомпенсации встречных потоков в плане гашения спутных вихрей вблизи обшивки корпуса, или иначе, снижению сопутствующего корабельного волнообразования на всех, включая закритически высоких скоростях хода.

Распределение гидродинамических сил по обшивке корпуса корабля

Моделирование корабельного волнообразования с использованием традиционных волновых уравнений строится на базе условий непротекания смоченной обшивки корпуса встречным потоком воды, для чего, *в первом приближении*, вдоль всей судовой обшивки распределяются вихреисточники, предопределяющие как касательную скорость проскальзывания воды по локальным элементам корпуса, так и нормальные компоненты для компенсации – отражения внешних потоков по ходу корабля, включая дополнительные воздействия со стороны штормовых волн.

Двойное скалярное произведение полной скорости \vec{v} с единичной нормалью \vec{n} определяет вектор \vec{v}_n для импульса отражаемого потока:

$$\vec{v}_n = (\vec{n} \cdot \vec{v}) \cdot \vec{n} . \quad [\text{м/с}]$$

Для исключения взаимокомпенсации отрицательные давления p_v ослабляются по ориентации проекции на нормаль $\vec{v}_n \propto 1 + (1 - k_v) \cdot n_v$. Если $k_v = 0$, то отрицательное давление при нормальной компоненте скорости сводится до нуля; при $k_v = 1$ ничего не изменяется и парадокс Даламбера действует в полной мере. Здесь n_v – скалярное произведение нормали с единичным вектором скорости. По умолчанию в программе Аурига установлен коэффициент $k_v = 0,5$.

Скользящий вектор \vec{v}_s строится двойным векторным произведением:

$$\vec{v}_s = [\vec{n} \times \vec{v}] \times \vec{n} = \vec{v} - \vec{v}_n . \quad [\text{м/с}]$$

Вектор \overleftarrow{v}_\perp зеркального отражения от площадки \overleftarrow{n} требуется при разностном моделировании отражённых от смоченной обшивки ходовых корабельных и внешних штормовых волн:

$$\overleftarrow{v}_\perp = (\overleftarrow{n} \cdot \overleftarrow{v}) \cdot \overleftarrow{n} + \overleftarrow{n} \times [\overleftarrow{n} \times \overleftarrow{v}] = v_n - v_s. \quad [\text{м/с}]$$

В гидромеханике маневрирующего корабля задействуются все компоненты скоростей, в частности касательная скорость включается в понижение давления вблизи обшивки по фундаментальному гидродинамическому закону Бернулли:

$$\delta p = \rho \cdot (V^2 - v_s^2) / 2 = p_v - \rho \cdot v_s^2 / 2 = \rho \cdot (V^2 - |\overleftarrow{n} \times \overleftarrow{v}_s|^2) / 2, \quad [\text{кг/м}^2\text{/с}^2]$$

где V – скорость хода корабля, v_s – скорость потока, скользящего в плоскости элементарного треугольника. Скорость хода корабля должна представляться некой интегрально осредненной величиной по смоченной поверхности. В любом случае поправка по Бернулли приводит к условно симметричному подвсплытию корпуса за счёт небольшого повышения гидродинамического давления в оконечностях корпуса корабля.

Нормальная компонента скорости создает асимметричный импульс отраженного потока. Так, носовая оконечность выдавливается набегающим потоком на всплытие, тогда в корме происходит разрежение с подсосыванием кормового подзора на погружение. Получается ходовой дифферент корму, что видится зарождением искусственной горы перед носом корабля, подъём на которую формально увеличивает сопротивление движению корабля даже на тихой воде.

$$\delta p = \rho \cdot (\overleftarrow{n} \cdot \overleftarrow{v}_n) \cdot |\overleftarrow{n} \cdot \overleftarrow{v}_n| / 2, \quad [\text{м}^2\text{/с}^2]$$

где: δp – изменение давления воды на элементе бортовой обшивки. Векторные обозначения здесь существенны, и показывают направление действия сил давления, но лишь с точностью до наоборот

Если же на всю длину днища будет подъем условно горизонтальной поверхности днища, в том числе за счет сильного расхождения (развесистости) носовых ветвей шпангоутов, то следует ожидать возможности выхода корабля на глиссирование при достижении достаточно больших скоростей хода.

Для водоизмещающего судна более адекватным гидродинамическим решением является исключение ходового дифферента, что вполне достигается устройством клиперских скуловых обводов в оконечностях корпуса, с закручиванием набегающего потока на предельно слабо искривлённых поверхностях судовых обводов от форштевня под днище, и из под днища в сторону кормового подзора. Последнее с некоторыми оговорками относительно создания плавного потока и благоприятных условий в зоне работы рулей и движителей.

Поверочная модель корабельного волнообразования

Рассматривается чисто оценочный механизм образования корабельных волн, с обращением внимания на сопутствующие концептуальные решения о возможности беспрепятственного прохождения штормовых волн через корпус корабля, с минимальными искажениями волновых фронтов – с минимальным силовым воздействием на корабль.

Гидромеханика корабля и его взаимодействие с внешним волнением адекватно описывается в рамках математической модели Мичелла [9], с поправками по Кочину [10] для частичного уточнения ширины корпуса и углов схождения ватерлиний.

Корабельное волнообразование, также как и воздействие штормовых волн, происходит полосе бортовой обшивки на уровнях переменных ватерлиний, омываемых под воздействием вертикальной и килевой качки корабля. Велико влияние бортовой качки, однако оценка этого безусловно сильного процесса будет выполняться здесь, в следующей главе, с постановкой и проведением серии прямых вычислительных экспериментов по моделированию реальной штормовой гидромеханики корабля.

В математической классике по Мичеллу-Кочину не рассматриваются касательные компоненты скоростей вблизи корабельной обшивки, в расчетах, как правило, никак не учитывается изменение посадки или дифферента корпуса при движении с различными скоростями. Большие скорости хода корабля вполне

⁹ Mr. Jonh Henry Michell Michell on the Wave–Resistance of a Ship. Philosophical Magazine, 1898, vol.45, Ser.5, pp.106–123. ShipDesign.ru/JHM-rus.html

¹⁰ Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. М.: Физматгиз, 1959, ч. I, 584 с., ч. II, 728 с.

сопоставимы в плане излучения корабельных волн с воздействием волн и зыби относительно большой длины, и в морской практике такие волны зыби наблюдаются с относительно невысокой крутизной. Именно это и необходимо для изначального оценочного анализа с последующим проектным синтезом элементов корабельных обводов и общекорабельной архитектуры корабля повышенной штормовой мореходности в целом.

Физическая интерпретация уравнений корабельного волнообразования становится наглядной, и допускающей геометрические оценки процессов волнообразования и отражения внешних волн в том случае, если все подынтегральные выражения и аргументы будут записаны в размерном виде. Интегралы для расчетов волнообразования с одной стороны сингулярные, но сходящиеся, и с другой не терпят разрыва лишь за счет адекватного учёта сильнейшей высокочастотной осцилляции. В практической гидромеханике жидкости, и тем более в природе гравитационных волн на глубокой воде, не может возникать сингулярных разрывов, и тем более исключены какие-либо высокочастотные явления с гравитационными волнами на поверхности воды. Численная работа с интегралами в размерном виде позволяет своевременно включать в расчёты адекватные асимптотики, либо просто сводить решения в локальных подобластях к экспериментальным – эмпирическим зависимостям.

Отметим сразу, что в обычных стационарных задачах корабельного волнообразования не участвует время, то есть, геометрические построения сводятся к стационарным – неподвижным волновым картинам в локальных отсчётах движущегося с постоянной скоростью корабля. Излучение волн от движущегося корабля происходит в диапазоне от предельно малых длин расходящихся волн, до максимальной по длине поперечной волны: $\lambda = 2\pi V^2/g$, проявляющейся за кормой корабля, где V [м/с] – скорость хода корабля.

Пусть безразмерное число $M = \sqrt{\lambda/\lambda}$ – будет соотношением длин для максимальной поперечной волны λ [м] к расчетной фазовой волне λ [м]. Отметим, что множитель M сам по себе привносит сходящуюся сингулярность порядка $\lambda^{-1/2}$ даже в случае фиксированной скорости хода, и в целом интеграл для амплитуды волны может давать бесконечно большие величины, что никак не может соответствовать жестким ограничениям высоты в природе гравитационных трохoidalных волн на воде.

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

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

где $A(\lambda)$ [м] – амплитуда излучаемой корабельной волны заданной длины λ , измеряемая вблизи смоченной обшивки корпуса корабля x_0, y_0 ; R_x – силовая реакция корабельного волнообразования на скорости хода V_0 . Все величины рассматриваются в физически значимых определениях: $k = 2 \cdot \pi / \lambda$ – волновое число для данной фазовой волны; $\omega_0 = x_0 / M + y_0 \cdot \sqrt{M^2 - 1} / M$ – пространственный отсчёт фазы для излучаемой корабельной волны.

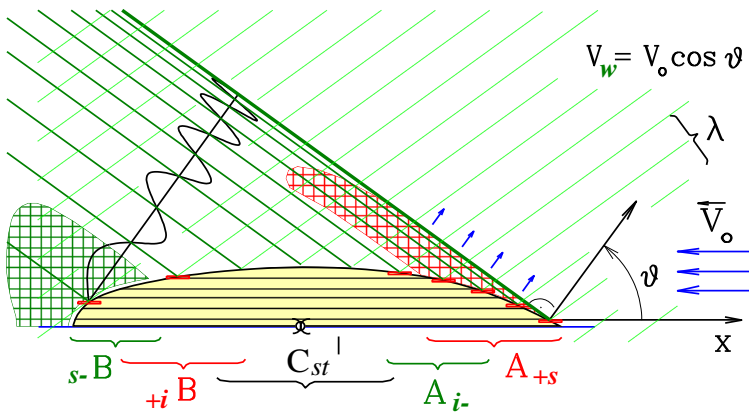


Рис. 10. Волнообразование, как процесс отражения волн от поверхности корпуса корабля. В зонах A_{+s} и $s-B$ происходит рост гребня трохоидальной волны, неспособной оторваться от корпуса судна.

Механико-геометрическая интерпретация гидродинамических процессов в интеграле Мичелла (**Рис. 10**) связывает механизм отражения от корпуса корабля внешних волн [5, 7], условно набегающих под косыми углами ϑ в диапазоне длин: $\lambda \in [0 \div \Lambda = 2 \cdot \pi V_0^2 / g]$, где: Λ – длина поперечной корабельной волны, соответствующая скорости хода V_0 . В оконечностях корпуса в зонах: $s-B$ и A_{+s} – корабельная волна не может оторваться от корпуса и волновые процессы обращаются сложением коротких волн в форме интенсивного источника – струи жидкости вблизи судовой обшивки.

Тогда, наиболее ответственными участками по длине корпуса становятся зоны A_{i-} и $+iB$, где происходит трансформация присоединённого гребня в свободно расходящуюся корабельную волну. Если в скуловых обводах корпуса не

предусмотрено затягивание гребня волны под днище корпуса, то вблизи корпуса будет формироваться интенсивнейшая расходящаяся волна, в первую очередь свидетельствующая о нарушениях плавности набегающих на корпус потоков воды, с множеством негативных последствий.

Предварительный проектный анализ формы корпуса вполне возможен на основе вычислительных экспериментов в рамках Мичелловских моделей корабельного волнообразования и волнового сопротивления на всех, включая экстремально высокие скорости хода. Поиск оптимальных вариантов и проектных прорисовок фрагментов обводов корпуса будет определяться сглаживанием и снижением экстремумов удельного волнового сопротивления на относительных скоростях по Фрудру порядка $F_n \approx 0,3$ и $0,5$, и что особо важно, с контролем минимального ущерба для теоретических минимумов волнообразования вблизи скоростей хода $F_n \approx 0,2$ и $0,4$.

Весьма неожиданный, кстати, результат, но именно расчеты корабельного волнообразования и волнового сопротивления с использованием интегралов Мичелла особо чувствительны к оценкам гидромеханики клиперских скуловых обводов, и их различия с «системой струйного образования». При этом, для «струйной системы» как бы подтверждается 2÷3% выигрыша в удельном волновом сопротивлении на предельно больших скоростях хода $F_n > 0,5$, где становится существенной лишь форма мидельшпангоута, но не более чем на величину привносимого в знаменатель коэффициента общей полноты корпуса, при явных нарушениях гидромеханики плавных, незакрученных и безотрывных потоков вблизи скуловых обводов в оконечностях.

Принципы непротиворечивого проектирования обводов корпуса прорицают необходимость небольшого завала борта на уровне действующей ватерлинии, что естественным образом снижает волнообразование на больших скоростях хода по $F_n > 0,4$, которое формально более всего зависит именно от ширины корпуса.

Вся ценность численных экспериментов по моделированию корабельного волнообразования состоит в возможности анализа скоростных режимов при $F_n < 0,4$, на которых проявляются геометрические особенности корабельных обводов в планах минимизации процессов излучения корабельных волн, и сопутствующего снижения силового воздействия на корабль аналогичных по характеристикам волн штормовых.

Шлюпка - эллипсоид с равноудалёнными ватерлиниями

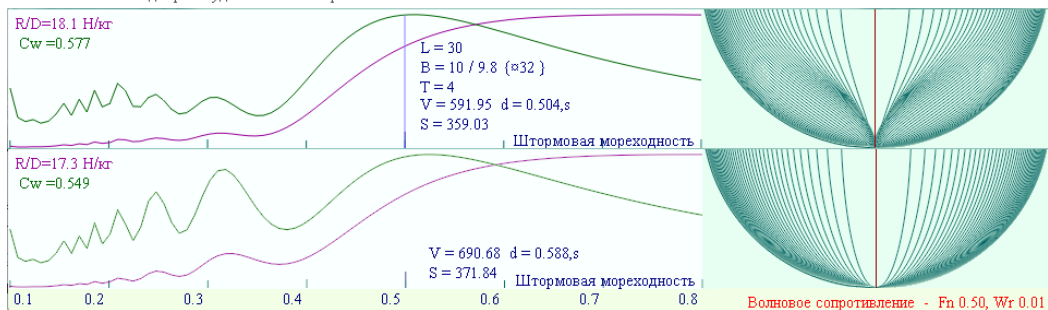


Рис. 11. Слева кривые коэффициентов волнового сопротивления C_w , и удельного по отношению к водоизмещению волнового сопротивления R/W [Н/кг]. Справа теоретические (расчётные) шпангоуты в проекции корпуса.

Fn скорость	Удельное сопротивление [Н/кг]				Коэффициент сопротивления			
	R/D-клипер		R/D-струйн		Cw-клипер		Cw-струйн	
0,5	13,756	15,323	12,1	13,16	-	-	-	-
0,36	1,629	1,393	2,941	3,008	0,13843	0,137	0,23607	0,25379
0,31	1,991	1,791	4,325	4,7	0,21926	0,21235	0,48312	0,51996
0,27	1,086	0,995	1,557	1,316	0,14425	0,14385	0,3608	0,22903
0,25	1,267	1,194	2,422	2,256	0,2308	0,2329	0,22509	0,40854
Масштаб	18,1	19,9	17,3	18,8	0,577	0,685	0,549	0,619

Корпус - эллипсоид с обводами кубической полноты

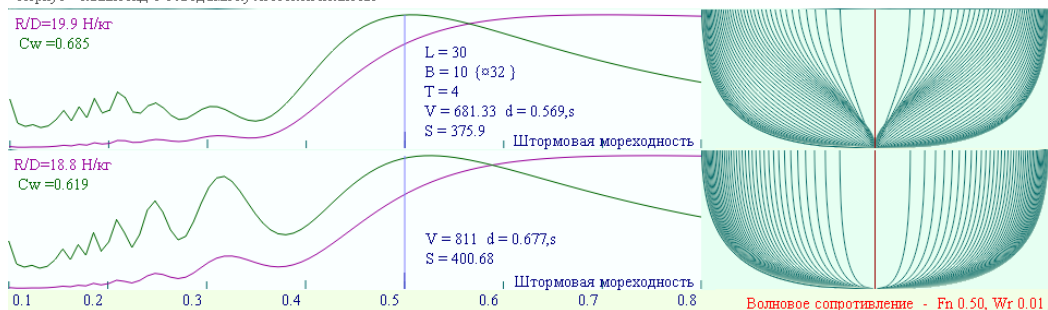


Рис. 12. Слева кривые коэффициентов волнового сопротивления C_w , и удельного по отношению к водоизмещению волнового сопротивления R/W [Н/кг]. Справа теоретические (расчётные) шпангоуты в проекции корпуса.

К величайшему сожалению, в практике проектирования кораблей Военно-морского флота России, повсеместный отказ от английских клиперских обводов в пользу 2-3% «струйной полноты», означает лишь многократное увеличение интенсивности силового воздействия штормовых волн в скуловых зонах корабля. Такой эффект резко проявляется даже в случае простейших эллипсоидальных

обводов корпуса (Рис. 11), где наблюдаются более чем двукратные потери на интересующих нас скоростях излучения преимущественно расходящихся корабельных волн, на полных ходах настоящих кораблей.

Не ограничиваясь элементарно простыми обводами корпуса, рассмотрим по два проекта перспективных кораблей повышенной штормовой мореходности, и в заключение – кораблей исторического и действующего флота СССР.

Первая малоразмерная модель строилась и испытывалась в Атлантическом океане и в Чёрном море, несколько опытов с малой моделью проводились в гравитационной системе опытового бассейна кафедры теории корабля Ленинградского кораблестроительного института. В то время еще не акцентировалось внимание на особенностях английской клиперской скулы с V-образными шпангоутами, её «невероятно» высоких качества в сравнении с прибытком полноты корпуса в «системе струйных образований». По сути последнее означает эквидистантные ватерлинии с никак не неоправданным загибом батоксов вниз под ватерлинией, и это в наиболее ответственной за мореходные качества зоне носовой скулы.

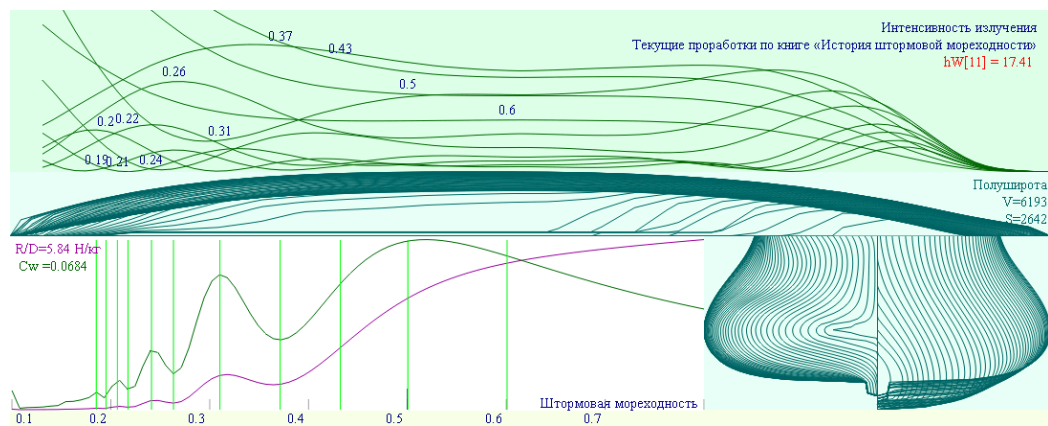


Рис. 13. Вычисление волнового сопротивления; интенсивности излучения и интерференции корабельных волн вдоль корпуса опытовой модели 1979-1980 гг.

Сразу обратим внимание на четырехкратное снижение максимального удельного сопротивления на сверх больших скоростях хода $Fn > 0.5$, в сравнении с упрощенными эллипсоидальными моделями. Можно предположить проявление пиков на меньших скоростях хода $Fn < 0.5$ простым изменением масштаба относительно экстремумов графика. Тем не менее, факт, для судна с эквидистантными скуловыми ватерлиниями (Рис. 13) характерно интенсивное волнообразование с крупными обрушающимися гребнями расходящихся

корабельных волн на скоростях хода порядка $Fn \approx 0.3$, что не мешает вполне оптимистичным оценкам коэффициента волнового сопротивления на больших скоростях хода $Fn \geq 0.5$, что обуславливается весьма заметным завалом борта на уровне действующей ватерлинии.

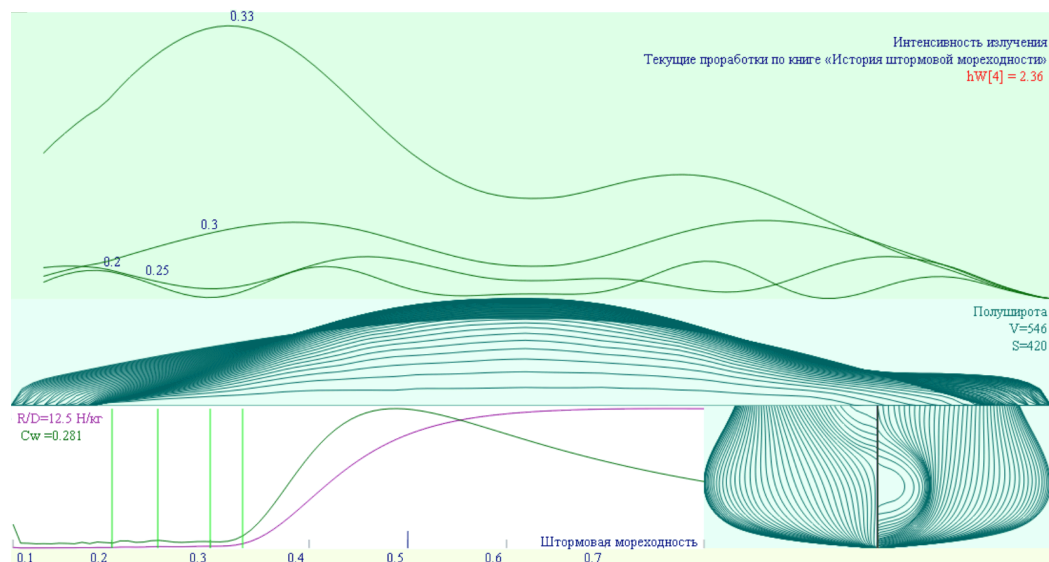


Рис. 14. Аналогичные оценки интенсивности корабельного волнообразования и волнового сопротивления для модели 1987 года, обладающей скуловыми сужениями в носовых и кормовых обводах при сопряжении потоков воды между бортовыми и днищевыми поверхностями.

В другом примере (**Рис. 14**), с моделью разработанной по результатам большой серии мореходных испытаний в опытовом бассейне кафедры теории корабля Ленинградского кораблестроительного института, складывается благоприятная интерференция корабельных волн, что наглядно представляется на кривой волнового сопротивления вплоть до скоростей хода $Fn \approx 0.35$. Заметное увеличение волнового сопротивления на $Fn \approx 0.5$ объясняется относительно большей шириной корпуса, с меньшим завалом борта на уровне действующей ватерлинии, что соответствует оценкам влияния на удельное сопротивления общей полноты корпуса.

В экспериментах с такой опытовой моделью не фиксировалось крупных расходящихся волн, при видимом эффекте «затягивания» излучаемого гребня новой корабельной волны под днище корпуса. В штормовых испытаниях наблюдалась трансформация килевой качки в преимущественно вертикальную, что удовлетворяет лучшей штормовой ходкости и управляемости.

Мореходные испытания этой модели на чистой воде подтверждали результаты вычислительных оценок ходкости. На большой скорости хода $F_n > 0.5$ крупная расходящаяся волна не влияла на подпорный поток у носовой скулы, отчего отмечался небольшой ходовой дифферент на нос. На относительно длинной волне наблюдалась взаимокомпенсация внешних силовых воздействий, со снижением интенсивности килевой качки и вертикальных ускорений в оконечностях корпуса на ходу корабля, что улучшает условия обитаемости и сохранности грузов на борту перспективного корабля.

Держа в руках модель крейсера «Аврора» складывается впечатление, что у этого проекта корпуса всё есть малый огрех в стремлении к увеличению полноты и водоизмещения за счет мореходных качеств. Но в те исторические времена это еще выражалось весьма слабо, но всё же заметно сказывалось на росте интенсивности расходящейся корабельной волны (*иллюстрация в следующей главе*).

Далее рассматриваем один корабль иностранного проекта, это лидер эсминцев «Ташкент», построенный в Италии 1935 году.

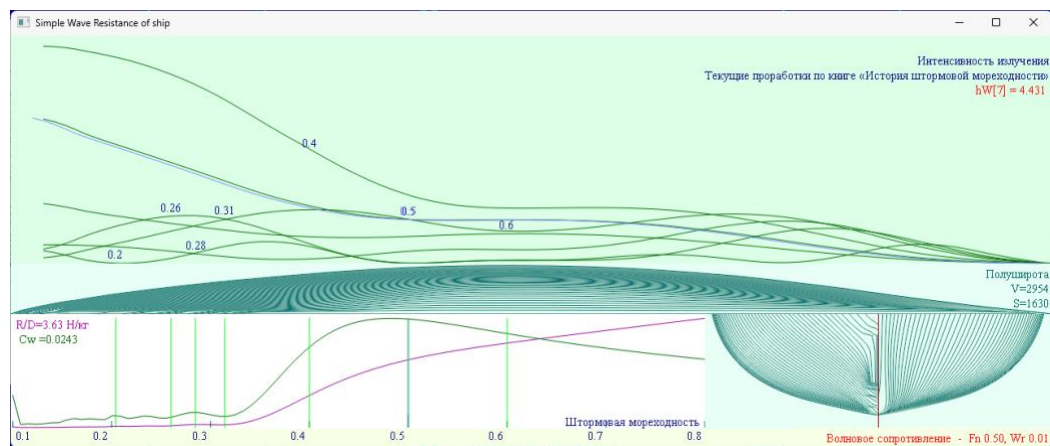


Рис. 15. Лидер эсминцев «Ташкент» итальянской постройки.

Лидер «Ташкент» отличался особой ходкостью (**Рис. 15**), достигая на длинных переходах более 41 узлов скорости, что по Фрудру составляет $F_n = 0.58$, с образованием поперечной корабельной волны в 2,1 раза длиннее корпуса корабля. Обводы лидера великолепно отработаны, и совсем легкое бульбовое образование в носу способствует снижению ходового дифферента на корму до остаточных $0^\circ 12$ градусов.

Другой корабль будет вполне современным, с удивительно похожими на «Ташкентские» обводами в средней части корпуса, и это будет крейсер «Киров» из эпохи 80-годов СССР.

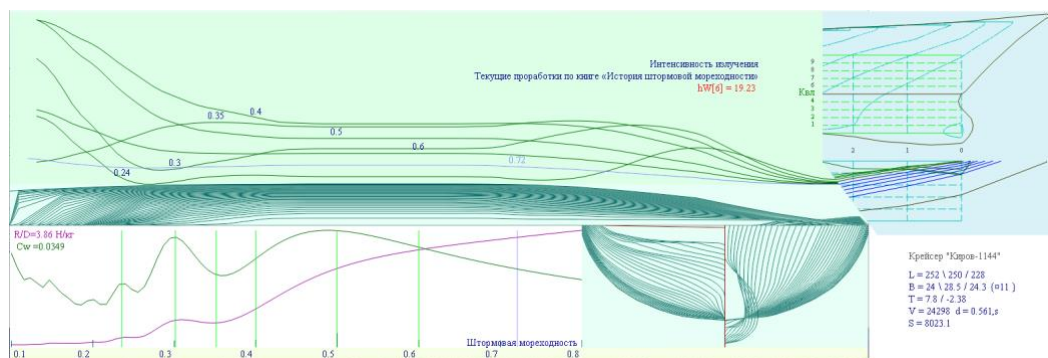


Рис. 16. Атомный крейсер «Киров» с эквидистантными и расходящимися ватерлиниями в районе носовой скулы. В правой части приведен фрагмент теоретического чертежа по носовой оконечности в проекциях бок и полуширота.

Атомный крейсер «Киров»¹¹ (Рис. 16) в принципе не нуждается в гигантских запасах топлива, и потому может обладать столь же малым коэффициентом общей полноты, и красивым округлым оформлением контуров шпангоутов в средней части корабля. Но всё же, если у «Ташкента» пик сопротивления на скорости $F_n = 0,25$ всего $R/D=0,025$ [Н/кг], то у «Кирова» почти на порядок больше $R/D=0,22$ [Н/кг], при этом максимумы этих величин по $F_n=0,8$ соизмеримы, что в общем и характеризует гидродинамические качества их мидельшпангоутов.

У крейсера транцевая корма, что формально исключило из расчетов довольно большой клин сходящихся кормовых ватерлиний, и потому уточненное волнообразование может прогнозироваться несколько большим. В то же время, на малых скоростях хода под кормой крейсера не ожидается благополучного и плавного потока воды. Ввиду разрыва схождения ватерлиний под кормовым подзором не получается обоснований для реальных количественных оценок волнового сопротивления. Плоский кормовой подзор с широким транцем в принципе не удовлетворяет исходным условиям для интегралов Мичелла, где аппроксимационными условиями предусматриваются только плавные ватерлинии

¹¹ Цифровая модель «Кирова» отчасти не соответствует реальному теоретическому чертежу, но показательные выводы и по искаженному корпусу не утрачивают актуальности.

с заострениями в оконечностях. То есть, корма должна быть крейсерской, иначе разрыв потоков в корме просто сбрасывает существенную часть волнообразования и сил волнового сопротивления, что реальной морской практике естественно невозможно.

Что касается обводов за бульбовым носом в зоне носовой скулы, то здесь всё могло бы быть существенно лучше. Хорошо отлаженный бульб должен действовать в помощь клиперским обводам носовой скулы (Рис. 15-«Ташкент»). Замена V-образных шпангоутов эквидистантными ватерлиниями, еще и с особо полными U-контурами из «системы струйного образования», приводит лишь к кратному усилению пакета расходящихся корабельных волн, так же как и к значительному усилению штормового воздействия на корпус корабля, что должно быть признано проектной ошибкой.

Вопросы ослабления килевой качки могут рассматриваться в качестве обратной математической задачи корабельного волнообразования на всех, включая закритически высоких скоростях хода корабля [L]. Выравнивание со снижением уровня кривой волнового сопротивления для корабельных волн, соизмеримых по длине со штормовыми волнами, в рамках интерпретации интегралов Мичелла соответствует прохождению волн через корпус корабля с минимальными искажениями, то есть – с минимальными импульсами силовых реакций на отражение корпусом таких гребней штормовых волн.

Но всё же, в целом к абсолютным величинам в приведенных вычислениях должно относиться настороженно, так как при аппроксимации сингулярностей в интегралах пока не получается определиться с точными пределами и постоянными интегрирования. Собственно форма кривых волнового сопротивления, где недоопределённые параметры интерполирования в едином расчётном алгоритме изменяются несущественно, должны получаться вполне приемлемые для проектного оценивания и практического использования результаты решения весьма сложной задачи гидромеханики.

[Корабль без килевой качки на ходу на волнении](#)

На основе вышесказанного разработан другой патент России, посвящённый обоснованию методов проектирования обводов корпуса для

«корабля без килевой качки на ходу на волнении»¹², и в нём определяется исторически верное, но подзабытое клиперское распределение геометрических построений ветвей шпангоутов вдоль корпуса, где формируются плавные и широкие V-образные скуловые поверхности закручивания набегающего потока (Рис. 4, справа) от вертикальной стенки у форштевня с последующим гладким и безотрывным затягиванием этой воды под днище корпуса.

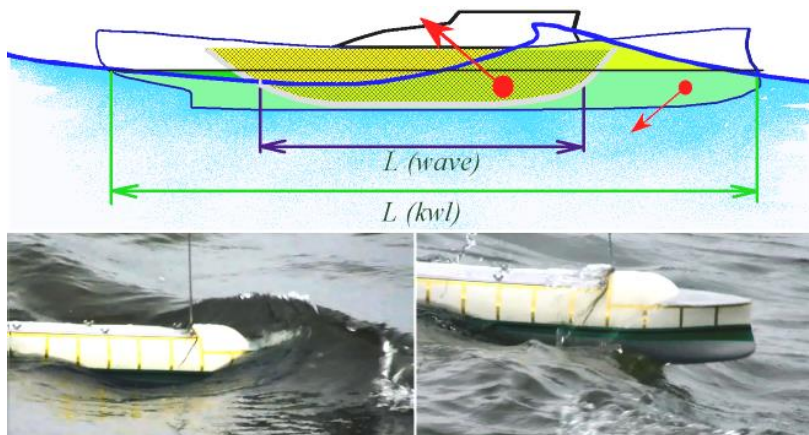


Рис. 17. Гидромеханика килевой качки интерпретируется с использованием исторического понятия волнообразующей – волнопринимающей длины корпуса $L(\text{wave})$, за пределами которой на $L(\text{kwl})$ корпус подпадает под прямые удары прогрессивных трохойдальных волн, где скуловые обводы и относительно низкий надводный борт должны способствовать стабилизации качки

Рисунок выше показывает результирующие реакции корпуса на вертикальное всплытие под действием интегральной силы внутри волнообразующей длины $L(\text{wave})$ с наибольшей полнотой ближе к средней части корпуса, с взаимокompенсацией от меньшей силы с большим плечом от миделя $L(\text{kwl})$, возникающей вследствие разрежения у скуловых обводов со специально закрученной и широкой поверхностью над заострёнными V-образными скуловыми шпангоутами за форштевнем. Отметим, что использование бульба лишь способствует большему углу закручивания потока для создания большего разрежения в зоне образования подпорной корабельной волны.

Теоретически предполагалось, что снижение интенсивности расходящейся корабельной волны должно приводить к соответствующему обратному решению

¹² «Корабль без килевой качки на ходу на волнении». Храмушин В. Н. Роспатент. Рег. № 2007133625 от 2007.09.07, вх. № 036722. Бюл. № 8 от 2009.03.20.

волновой задачи, сводящемуся к ослаблению силового воздействия набегающей на корпус штормовой волны. Отрабатываемое таким образом инженерное решение, конечно же, не избавляет корабль от реакции на интенсивное воздействие волн вдоль протяжённого корпуса корабля.

Здесь же допустимо предварительное замечание, что негативные мореходные качества усугубляются килевой качкой и рысканием при развесистом развале носовых ветвей шпангоутов и форштевня, при широкой транцевой консоли кормовой оконечности, создающих чрезмерные пульсации внешних сил под воздействием штормовых волн.

Экспериментальная проверка концептуального решения (Рис. 17, два фото внизу) превзошла прогнозы частичного ослабления килевой качки. Визуально корпус удерживался строго горизонтально¹³, килевая качка не наблюдалась вовсе, что формально представляется трансформацией угловых колебаний в чисто поступательные вертикальные.

Получался вполне качественный результат, так как весьма умеренная вертикальная качка особо не сказывается на штормовой ходкости корабля любыми курсами относительно гребней штормовых волн, и при этом не наблюдается избыточных кренящих импульсов, то есть модель демонстрировала приемлемую платформу для активного пользования бортовым оборудованием в комфортных для экипажа условиях.

При остановке двигателей и потере хода модель корабля приводится к естественному состоянию с сильной килевой качкой удлинённого тела на поверхности воды.

Формирование оконечностей и борта корабля нуждаются в более детальном описании. К тому же за прошедшие с 2015 годы нарабаталось обновление воззрений по методикам построения обводов корабля.

Оставаясь в рамках трёх патентов России, далее рассматриваются уточненные проектные решения для быстроходного корабля и тяжёлого судна, обводы которых как бы обрамляют спектр всевозможных инженерных решений по представлению теоретических чертежей и числовых моделей корпуса.

¹³ ShipDesign.ru/Invent/2007-05-22_China-1275_from_Marco_Polo_s_Map_with_Ship_on_Pacific_Ocean.mp4
Гидродинамическая компенсация килевой качки корабля на ходу на интенсивном волнении в открытом море. Прототипом корпуса является старинный китайский корабль, изображенный Марко Поло на «Карте Тихого океана с кораблем». 16,4 Мб.

В первых двух работах рассматриваются методики формирования оконечностей и скуловых обводов корпуса для достижения наилучшей штормовой ходкости, работоспособности бортового оборудования и комфортной обитаемости для экипажа. В третьей работе ориентация на предназначение корабля с размещением оборудования относительно высоко над водой, с должным заужением верхней палубы; либо предельное снижение высоты борта с максимальным расширением верхней палубы для обеспечения работы с заборными устройствами, тралами, кошельковыми неводами и т.п.

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

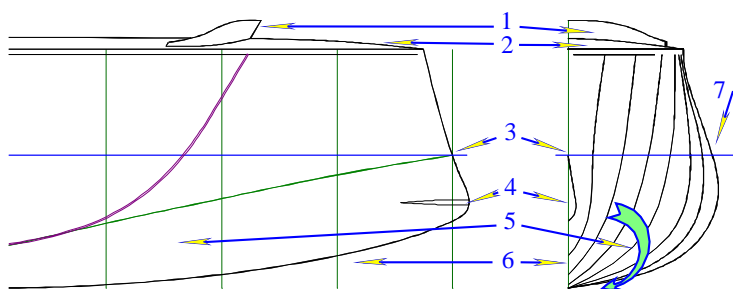


Рис. 18. Носовая часть корпуса быстроходного корабля, способного активно маневрировать в условиях ураганных ветров, штормового волнения и автономного плавания в обстановке средней ледовой сплошности.

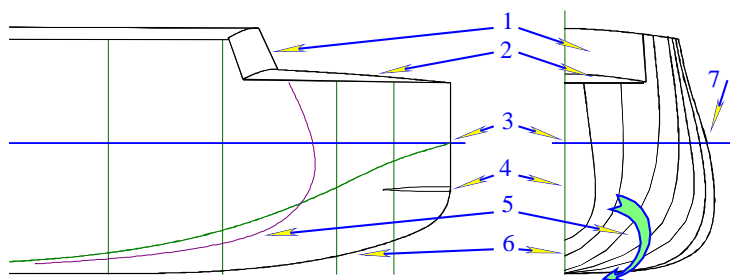


Рис. 19. Носовая часть корпуса тихоходного транспортного судна, способного удерживать заданное направление движения относительно малыми ходами в условиях ураганных ветров, штормового волнения и автономного судоходства в ледовой обстановке средней сплошности

Патентом России определяются проектные элементы в построении форштевня и носовых скуловых обводов¹⁴ быстроходного надводного корабля (Рис. 18) или относительно тихоходного гражданского судна (Рис. 19). Устанавливаются главные особенности взаимодействия корпуса со штормовым волнением, без противоречий с обеспечением автономного плавания судна в ледовых полях средней сплоченности, что является неперенным условием и требованием к навигации в северных и дальневосточных морях России.

Для достижения оптимальной ходкости и уверенной маневренности в штормовом плавании носовая оконечность быстроходного надводного корабля или относительно тихоходного гражданского судна должны строиться с использованием нижеперечисленных геометрических форм и конструктивных элементов в устройстве форштевня, скуловых обводов и надводной части носовой оконечности корпуса:

- устройство вертикального (Рис. 19) или заваленного в корму (Рис. 18) заостренного штевня на высотах от палубы бака до подводного уровня в диапазоне переменных ватерлиний, что послужит заострению конструктивной и подводных ватерлиний для режима прорезания гребней штормовых волн без вертикальных силовых импульсов, а также для удержания в надводном положении контактной кромки разламываемых ходом корабля ледовых полей, с предотвращением занывивания обломков льдин под скулу и днище корпуса;

- устройство штормового подреза в нижней части форштевня (Рис. 18, Рис. 19–6) 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;

- надводные ветви носовых шпангоутов могут иметь небольшой развал (Рис. 18) для гидродинамической компенсации возможного зарывания носовой части корпуса под гребни встречных волн в движении корабля на большой скорости хода. Тихоходному судну (Рис. 19) возможно устройство завала верхней

¹⁴ «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 № 2607136, Бюл.№ 1 от 2017-01-10. Пер.№ 2015107067/20(011473), от 2015-03-02. (составлено 2015-01-12, решение о выдаче патента 2016-07-27). ShipDesign.ru/Invent/08.html

части шпангоутных контуров и заниженную высоту выделенной палубы бака, которая могла бы принимать на себя массы воды из гребней волн, предотвращая развитие как килевой, так и вертикальной качки;

– за счет слабовыраженного бульбового образования в нижней части таранного форштевня (Рис. 18, Рис. 19–4) бортовая обшивка в диапазоне переменных ватерлиний образует винтообразную поверхность (Рис. 18, Рис. 19–5) по спрямленным V-образным шпангоутам в английском клиперском стиле, 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 на ходу произвольными курсами относительно штормовых волн. Как показано выше, клиперские обводы по носовой скуле в разы снижают интенсивность расходящихся корабельных волн, и столь же эффективно уменьшая силовое воздействие штормовых волн на носовую оконечность корабля.

– сразу за участком ватерлиний в зоне отрыва расходящейся корабельной волны может начинаться выпуклый изгиб шпангоутных контуров с образованием булей и завала борта на уровне действующей ватерлинии в средней части корпуса (–7), что необходимо для гидродинамической компенсации бортовой качки, а способствует расталкиванию плавающих льдов, предотвращая затягивания ледовых обломков в зону винто-рулевого комплекса под кормовым подзором. Формально так создается ледовой канал за кормой корабля.

– упрочнение таранной части форштевня на уровнях непосредственного воздействия ледовых полей и торосов (Рис. 18, Рис. 19–4), рассчитанное на предельные усилия при ударных нагрузках для раскола ледового поля на скоростях хода до 6 узлов (например, при движении с рыболовным 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, что не будет противоречить поддержанию остойчивости корабля, которая для снижения бортовой качки в штормовых условиях выставляется на предельно низком или нулевом уровне;

– форштевень естественным образом создает упор отчасти затупленной и прочной частью форштевня в нижних слоях ледового поля (Рис. 18, Рис. 19–4), где лед разогрет до температуры воды, а заостренный форштевень в надводной части (Рис. 18, Рис. 19–3) создаст критические колющие напряжения на поверхности

крупных льдин, где особая твердость и колкость ледового покрытия обуславливается низкими температурами охлаждающего сверху воздуха;

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

1. Волнолом быстроходного корабля (Рис. 18-1) и лобовая переборка шельтердечной надстройки тихоходного транспортного судна (Рис. 19-1), укрывающие экипаж от прямых ударов волн при необходимости работы на верхней палубе в свежую погоду;

2. Существенное уменьшение надводного объема в носовой части корпуса, в том числе за счет V-образных клиперских обводов, устраивается из принципа гидродинамической (Рис. 18) и гидростатической (Рис. 19) компенсации килевой и вертикальной качки, что достигается свободным проходом на низкую палубу встречных гребней штормовых волн. Уменьшение высоты и площади верхней палубы бака предотвращает накопление больших масс льда в условиях ветрового обледенения при залипании палубы штормовыми волнами.

3. Крайне важен шпатормовой подрез форштевня для раскрепощения свободного рыскания и обеспечения удовлетворительной маневренности корабля в условиях крупного штормового волнения.

4. Заострение форштевня на уровне действующей ватерлинии позволяет создавать плавно закрученную винтовую поверхность (геликоид) из спрямленных шпангоутных контуров, в стиле заостренных V-образных клиперских обводов, что требуется для гашения обрушающегося гребня расходящейся корабельной волны и аналогичного подтапливания и пропуска через корпус гребней штормовых волн, вовлекаемых в скуловой круговорот со всех видимых встречных курсов.

5. 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.

4. Таранное упрочнение форштевня, достаточное для ударного разрушения крупных льдин без остановки корабля на скорости до 6 узлов, или безопасно останавливающее корабль при столкновении с непроходимыми льдами или торосами на скорости до 3-4 узлов, с последующим созданием упорного усилия для подвижки ледовых полей и создания трещин или разводий для поиска путей прохода корабля в сплошных льдах.

Вышеперечисленные конструктивные особенности в едином комплексе 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 обуславливают возможность автономного плавания в режиме ледореза во льдах средней тяжести. 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»

По кормовой оконечности формально применяются те же методы построения скуловых обводов с V-образными шпангоутами в зоне плавного перевода набегающего потока из под днища к кормовому подзору в зону действия винто-рулевого комплекса. Основой методики¹⁵ снова представляется выравнивание потока, однако с некоторыми доработками по взаимокompенсации спутного вихреобразования, обеспечивающего устойчивую работу всего винто-рулевого и стабилизационного комплекса под кормовым подзором надводного корабля.

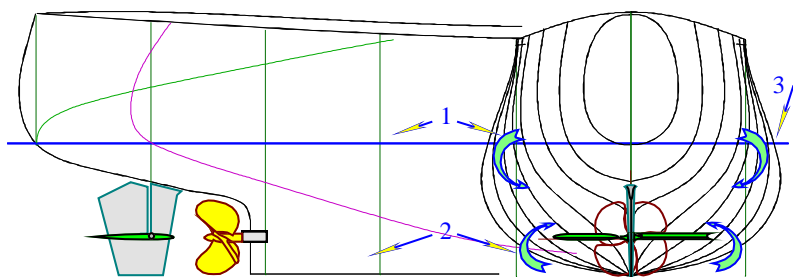


Рис. 20. Кормовая скула, подзор, раковина и ахтерштевень одновинтового корабля, оптимизированные по условиям снижения ходового дифферента и корабельного волнообразования.

¹⁵ «Кормовая оконечность стабилизированного для штормового плавания корабля» - Ахтерштевень и кормовой подзор корабля (Stern). Храмушин В. Н. Патент № 2607135, Бюл.№ 1 от 2017-01-10. (составлено 2015-01-12. ShipDesign.ru/Invent/09.html)

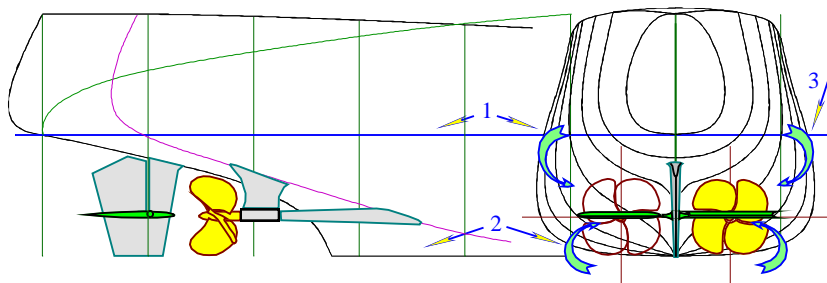


Рис. 21. Кормовая скула, подзор, раковина и ахтерштевень двухвинтового корабля.

На чертежах цифрами отмечены следующие конструктивные особенности судовых обводов в кормовой оконечности корабля:

1. Винтовая поверхность на уровне переменных ватерлиний в зоне корабельного волнообразования и отражения штормовых волн от корпуса корабля.
2. Винтовая поверхность создающая компенсирующий закрученный поток жидкости из под днища корабля под кормовой подзор – в зону винто-рулевого и стабилизирующего крыльевого комплекса.
3. Завал борта на уровне действующей ватерлинии способствует гидродинамической компенсации бортовой качки корабля, позволяя безопасно увеличивать собственные периоды бортовой качки при безопасном снижении или обнулении действующей начальной метacentрической высоты.

Винто-рулевой комплекс устраивается с одно- или в двухвальной установко гребных винтов, что существенно влияет на формирование скуловых обводов кормовой оконечности. Дополнительным условием ставится использование стабилизаторов килевой и бортовой качки, действующих в ускоренных потоках непосредственно за гребными винтами, как единственной зоной у корабля, где всегда динамически фиксирован вектор направления набегающего потока (**Рис. 20, Рис. 21**). Унифицированный комплекс инженерно-технических решений может быть представлен в согласии с концепцией непротиворечивого проектирования корабля как цельного инженерного сооружения:

– на уровне переменных ватерлиний создается винтовая поверхность на протяжении от бортовых булей до раковины, которая предотвращает отрыв расходящейся компоненты корабельной волны, с её частичной взаимокompенсацией с формирующейся поперечной волной за кормой корабля;

- такая винтовая поверхность приводит к естественному заострению раковины крейсерской кормы, что предотвращает удары волн и опасные захваты кормы корабля (бродяг) гребнями девятых валов;
- от днища до ахтерштевня создается вторая винтовая поверхность со встречным закручиванием потока, компенсируемого под кормовым подзором в области действия руля и крыльевых успокоителей качки;
- заостренная корма способствует задействию пассивных штормовых движителей для удержания безопасного курса при минимальной тяге от упругой реакции баллеров крыльевых стабилизаторов.
- 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.

Попутно гидродинамическая стабилизация кормовой оконечности корабля обеспечивает возможность движения на тихой воде без ходового дифферента, что согласуется с требованием минимизации внешнего силового воздействия со стороны штормовых волн. При уменьшении надводного объема над кормовой раковиной снижается силовое воздействие штормовых волн, предотвращается опасность опрокидывания при резкой качке на крупном волнении без хода, при этом дополнительно создаются условия для работы аварийных плавниковых движителей.

Одновинтовая схема винто-рулевого комплекса (Рис. 20) имеет консольное исполнение кормовой раковины, что требуется для предотвращения оголения гребного винта в условиях интенсивной килевой качки в штормовом плавании.

Двухвальная схема винто-рулевого комплекса (Рис. 21) 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 же время режим штормовых движителей с широко разнесенными крыльями будет способствовать некоторому усилению бортовой 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

...иначе, перечитать
поправит...

волновой энергии в длиннопериодной части спектра с фазовым смещением для гасящей интерференции с главной компонентой волнообразования – поперечной корабельной волной.

Такая винтовая поверхность на уровне переменных ватерлиний формирует малый надводный объем и естественное заострение раковины под крейсерской кормой корабля, что требуется для умерения вертикальной и килевой качки; для предотвращения ударов и опасных захватов кормы корабля (бродяжки) гребнями девятых валов на курсах по волне малыми ходами или в случаях аварийной потери хода, а также способствует сохранению слабоискаженного поля штормовых волн под кормовым подзором при остановке главных машин, что автоматически переключает успокоители килевой и бортовой качки в режим штормовых аварийных движителей для удержания корабля на заданном курсе под тягой жестких качающихся крыльев на упруго проворачивающихся горизонтальных баллерах.

Заостренная крейсерская корма не искажает гидродинамическое поле потоков воды в штормовых волнах под кормовым подзором корпуса при остановке главных машин, что автоматически переключает активные успокоители килевой и бортовой качки в режим пассивных штормовых аварийных крыльевых движителей для вывода корабля на безопасный штормовой курс, для чего общее устройство и форма кормовой оконечности должны оптимизироваться для поддержания управляемости даже при той минимальной тяге, которая возникает при вертикальных размахах кормовой оконечности в результате упругой реакции баллеров на пассивных крыльевых движителях;

Вторая винтовая поверхность, с осевой линией по килю корабля, служит созданию закрученного потока из-под днища корабля в сторону ахтерштевня. По этой винтовой поверхности происходит встречное закручивание существенно большего поддерживающего потока, что позволяет обеспечить взаимокompенсацию нижнего и верхнего, идущего на уровне переменных ватерлиний, завихрѐнных потоков в зоне кормового подзора, в области действия руля и горизонтальных успокоителей остаточной (нелинейной) килевой и бортовой качки корабля. Оба потока создают суммарную компоненту скорости потока жидкости вертикально вверх на малом удалении от бортовой обшивки, чем предотвращается затягивание битого льда из района бортовых булей в зону кормового винто-рулевого и стабилизирующего комплекса, и, как следствие, возникают гидродинамические условия для создания устойчивого ледового канала за кормой корабля.

Вышеперечисленные конструктивные особенности, в едином комплексе инженерно-технических решений, способствуют улучшению ходкости, маневренности и умерению качки в условиях интенсивного штормового волнения, а также обуславливают 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.

Конечно же, отработка корабельных обводов возможна только совместно с формированием надводного борта и общекорабельной архитектуры нового проекта корабля в целом. К согласованию методики проектирования подготовлено специальная заявка на патент, оконтуривающая варианты от высокобортного корабля с зауженной верхней палубой, до судна с предельной низким надводным бортом и широкой рабочей палубой, что важно для рыболовного и иного флота освоения морских ресурсов.

Надводный борт и верхняя палуба корабля

Борт и палуба корабля¹⁶ являются особо важными проектными элементами для обеспечения эксплуатационных и мореходных качеств по предназначению корабля, к его эксплуатации в сложных и штормовых условиях, на интенсивном волнении под ураганными ветрами. Однако проектные характеристики всегда целесообразно согласовывать с навигационными, гидрографическими и гидрометеорологическими условиями конкретных географических регионов и океанских акваторий. Проектирование корабля для субэкваториальной зоны не обязано учитывать штормовые требования к условиям мореплавания, проще в наставлениях мореплавателям указать наличие портов-укрытий и укрытых от моря бухт на побережье. Для Российского флота, на гигантских морских путях в северных дальневосточных морях, нет возможности прибегать к защите в портах убежищах, флот штормует в открытом море, или в особо опасных гидрофизических районах – на открытых рейдах вблизи морских портов. То есть, условия штормового мореплавания для всего Российского флота являются важнейшими при рассмотрении новых проектов судов, также как и при организации дальних и каботажных морских коммуникаций.

¹⁶ «Надводный борт и верхняя палуба корабля» (Deck). Заявка: № 2016150045 от 2016-12-19, вх.№ 080344, публ.бюл.№17 от 2018-06-20. ShipDesign.ru/Invent/13-Ship_Deck.html

Снова пользуемся концепцией непротивления силовому воздействию гребней штормовых волн и ураганных ветров, предполагая все виды гидродинамической взаимокompенсации килевой и бортовой качки, с возможностями комфортного обитания экипажа, сохранности крепления грузов и работоспособности бортовых механизмов и специального оборудования.

Надводный борт и прилегающие фрагменты верхней палубы оптимизируются для поддержания эффективности палубных работ в различных условиях эксплуатации корабля, с учетом необходимости минимизации качки и достижения наилучшей ходкости и маневренности в условиях интенсивного штормового волнения, отражающихся в инженерных заключениях при назначении высоты надводного борта и распределении прилегающих к борту фрагментов верхней палубы:

- высота надводного борта по всему периметру корпуса корабля оптимизируется из условия равнообъемной заливаемости верхней палубы на ходу корабля в условиях интенсивного волнения, при которой основная масса воды на верхней палубе частично компенсирует дифференцирующее 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) неразрывные вдолькорпусные рубки и громоздкие палубные устройства не позволяют потокам воды свободно перетекать на противоположный борт, в то время как фальшборты со штормовыми портиками удерживают значимый уровень воды на палубе в течение полупериода бортовой качки;

- 2) при заливании на палубу бака крупного гребня встречной волны, быстрый поток воды подламывается и в значительной мере сбрасывается за борт с помощью относительно высокого носового волнолома;

- 3) активная площадь палубы низкобортного юта уменьшается устройством узкой крейсерской кормы, бортовых уступов для траловых досок, или установкой палубных рубок и громоздких судовых устройств, не допускающих удержание на верхней палубе вихревого водоворота из попутных гребней штормовых волн, предотвращая тем самым риск гидродинамического захвата корпуса с возникновением опасного брочинга;

- по всему корпусу корабля, для снижения внешнего силового воздействия штормовых волн, устраивается предельно малая высота борта с относительно малой шириной и площадью прилегающей верхней палубы, либо с ощутимым

завалом борта для уменьшения общей ширины палубы. По необходимости, объемные надстройки и широкие палубы устраиваются выше над открытой верхней палубой.

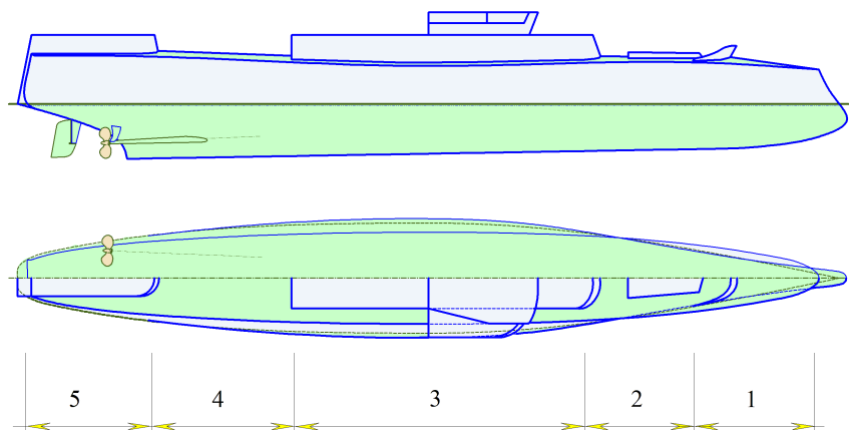


Рис. 22. Вариант построения и геометрической оптимизации корпуса корабля с относительно высоким и заваленным внутрь надводным бортом, со значительно заууженной шириной верхней палубы. Форштевень предельно малой высоты и сильно завален, что служит обеспечению штормовой ходкости в режиме прорезания гребней 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. 22).

Вариант рыболовного судна (Рис. 23) с предельно низким надводным бортом и максимально широкой рабочей палубой. Проектными решениями достигается возможность всесезонного и всепогодного выполнения палубных и забортных работ в особых навигационных и гидрометеорологических условиях, под штормовым ветром и на интенсивном волнении открытого моря.

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

1. Завышенная 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. 22), за волноломом, располагаются горловины трюмов и барбетов вооружений, у рыболовного судна (Рис. 23) этот участок носовой палубы укрывается герметичной надстройкой;

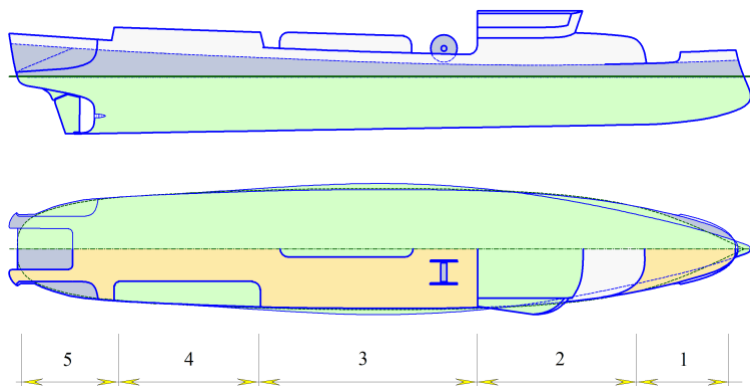


Рис. 23. Формирование общекорабельной архитектуры рыболовного судна с предельно низким надводным бортом для обеспечения эффективной и безопасной работы траловой команды в условиях штормовых ветров и интенсивного волнения на море. Необходимый запас плавучести обеспечивается включением в герметичный контур корпуса носовой надстройки и палубных тамбуцинов.

3. В средней части корпуса высокобортного корабля располагается протяженная рубка, препятствующая перетоку воды по верхней палубе на подветренный борт. На широкой промысловой палубе рыболовного судна за фальшбортами укрываются громоздкие траловые и кабельные лебедки, которые разделяются удлиненной тамбучиной в диаметральной плоскости траулера. Общая площадь портиков и шпигатов под фальшбортом обеспечивает слив воды за время полупериода штормовой волны, тогда как заливание или зачерпывание нового потока происходит практически мгновенно во второй полуфазе под воздействием крупного гребня последующей штормовой волны.

4. Кормовая секция на ходу корабля менее всего подвержена вертикальной качке, и потому здесь целесообразно размещать сложное палубное оборудование или устраивать вертолетные площадки. На рыболовном судне в укрытом бортовыми тамбучинами секторе траловой палубы выполняются наиболее ответственные операции с переключениями кабелей и ваеров, с параллельной подготовкой поднимаемого трала к выливке рыбы и дублирующей постановкой нового трала по противоположному борту.

5. Ют является наиболее комфортным участком верхней палубы корабля, где в случае транспортных или пассажирских судов целесообразно устраивать прогулочные палубы. На ходу корабля ют весьма спокойное место, однако при

потере хода, что происходит, например, при выборке трала, широкая корма подвергается интенсивному воздействию штормовых волн с высокой заливаемостью верхней палубы. По первому варианту (Рис. 22) 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. 23) – слип кормового трала, зона повышенного внимания экипажа и траловой команды, особенно в моменты подъема трала, когда судно становится на курс по волне.

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

Предварительное заключение по форме корпуса корабля в целом можно дополнить исходя из опыта морской практики.

def В построении общекорабельной архитектуры полезно заострение носовых ватерлиний за счёт завала форштевня, отчего при небольшом развале надводных ветвей носовых шпангоутов палуба бака естественно расширяется, при общем уменьшении объема носовой оконечности, с благоприятным закручиванием набегающего потока вдоль поверхности судовой обшивки в районе формирования скуловых обводов. Консоль кормовой раковины должна образовывать крейсерскую корму также без избыточных надводных объёмов. Ключевым элементом формы кормовой оконечности представляется согласованное сглаживание потоков в области от днищевого к бортовому сопряжению – от скулы к кормовому подзору, захват которых должен способствовать стабилизации качки в кормовой оконечности в условиях штормового волнения, и как следствие, созданием условий поддержания плавного поступательного, слабо завихрённого (безвихревого) и безотрывного спутного потока в зоне действия винто-рулевого комплекса в целом.

Выше в работе упоминались стабилизаторы килевой и бортовой качки в потоке за гребными винтами. Уместно и здесь кратко изложить суть инженерно-технической, качественной флотской разработки на основе морской грамотности.

Активный стабилизатор килевой и бортовой качки корабля – штормовой аварийный движитель

Уменьшение внешних штормовых воздействий, построенное на принципах взаимокompенсации внешних возмущающих и восстанавливающих сил и моментов, откликается хоть и замедленными, но заметными по величине проявлениями от воздействий иной, формально ослабленной природы. Так, стабилизация качки с малыми моментами инерции площади действующей ватерлинии может отзываться излишним креном под действием ветра, при перекладках рулей; к избыточному дифференту при ускорении или реверсировании хода, и т.п.

Нескомпенсированные углы крена или дифферента должны гаситься задействованием активных стабилизаторов бортовой и килевой качки¹⁷, в расчёте на достаточность относительно слабых управляющих воздействий на силовое подавление условно «незначительных» внешних сил.

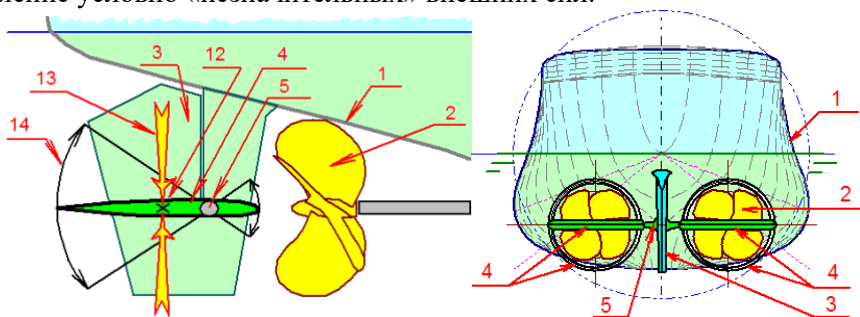


Рис. 24. Винторулевой комплекс с вертикальным рулем (3) и горизонтальными крыльями активных успокоителей килевой и бортовой качки (4), которые в случае остановки гребных винтов (2) автоматически обретают режим аварийных штормовых движителей. 1 – корпус корабля; 4 – стабилизирующее крыло, справа вариант с поворотными насадками; 5 – баллер установлен строго на линии балансирующей оси в потоке за гребным винтом, и допускает упругий поворот на угол $\pm 30^\circ$; 12 – центр площади крыла, к которому сводится суммарная сила (13) при вертикальной качке кормовой оконечности; 14 – угол упругого поворота плоскости крыла.

В штормовых условиях стабилизированный по направлению поток жидкости вблизи корпуса корабля имеется только под кормовым подзором, непосредственно за работающими гребными винтами (Рис. 24). И только здесь

¹⁷ «Активный стабилизатор килевой и бортовой качки корабля – штормовой аварийный движитель». Патент № 2384457 от 20.03.2010 г. Бюл. № 8. Пер. № 2008116649, от 24.04.2008 г., вх. № 018958. (решение о выдаче 2009-10-01). ShipDesign.ru/Invent/04.html

возможно адекватное управляющее воздействие по активной стабилизации крена и дифферента корабля в штормовую погоду, или при быстрой циркуляции на тихой воде.

Активный стабилизатор килевой и бортовой качки корабля – штормовой аварийный движитель (Рис. 24) состоит из двух управляемых жестких крыльев или поворотных насадок, установленных на горизонтальных или наклонных баллерах в кормовой оконечности корабля под прямым воздействием потока жидкости от работающих гребных винтов.

Технические аспекты и особенности работы крыльевой системы:

- баллеры устанавливаются по балансирной оси для снижения усилий на перекладку на больших скоростях хода корабля;
- углы поворота враздрай создают компенсирующую пару сил по бортовой качке; синхронная перекладка крыльев на всплытие/погружение – для компенсации килевой качки;
- при задействовании двух наклонных крыльев (Рис. 25) активный стабилизатор качки берет на себя функции руля управления;
- упругий люфт порядка $\pm 30^\circ$ поддается воздействию пар сил от оси баллера с геометрическим центром площади крыла, и в случае остановки корабля будет действовать как волновой движитель с пассивно управляемыми крыльями.

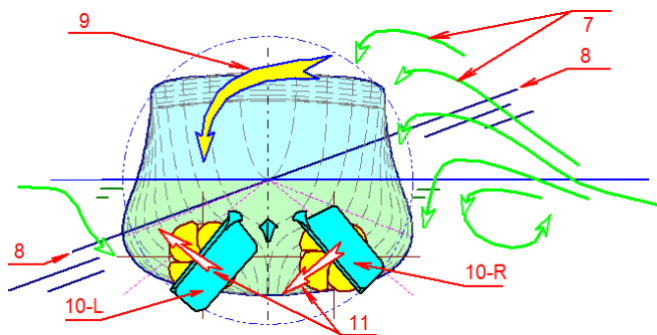


Рис. 25. Воздействие гребней штормовых волн (7); уровень склона волны вблизи корпуса корабля (8), и кренящий момент (9) их суммарного воздействия. Синхронная перекладка правого крыла (10-R) на погружение и левого крыла (10-L) – на всплытие, создают необходимую пару сил (11) для компенсации воздействия внешнего кренящего момента. Форма и положение центра площади крыльев могут быть настроены на автоматическую компенсацию крена на циркуляции.

В случае потери хода кормовая оконечность обретает огромный размах вертикальной качки под воздействием штормовых волн, что усиливается полнотой комовой раковины, устраиваемой для обеспечения безотрывного потока

в зоне действия гребных винтов. То есть, именно в аварийных ситуациях штормования без хода появляются возможности активного задействования крыльевых устройств в качестве машущих плавниковых движителей. Пассивный плавниковый движитель не требует дополнительных силовых или управляющих воздействий на крыльевые устройства, а упругий поворот (*люфт*) баллеров на угол до $\pm 30^\circ$ станет оберегать корпус от ударных волновых воздействий, что столь же важно и в режиме активной стабилизации качки на ходу корабля.

При использовании вертикального пера руля и двух горизонтальных стабилизирующих крыльев (Рис. 24) математические законы имеют каноническую форму условно независимых реакций на возникающий крен и дифферент корабля. На тихой воде стабилизаторы не допустят крен на циркуляции корабля с малой начальной остойчивостью на больших скоростях хода, что также является важным мореходным качеством корабля при его эксплуатации.

Наклонные крылья (Рис. 25) служат рулями управления, которые при синхронной перекладке компенсируют центробежное устремление возвышенного центра масс корпуса на быстрой циркуляции. В качестве успокоителей качки активная работа крыльев кренит корабль 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 устройство¹⁸, где гибкое машущее крыло становится движителем, успокоителем качки и рулевым устройством одновременно, и которое также способно создавать тягу по излагаемым здесь принципам пассивного штормового аквадвигателя.

Корабль с плавниковым движителем

Гибкий машущий плавник из последовательности изогнутых полосовых поверхностей в цепной связке с жесткими ребрами, зафиксированными на бегущей волне синусоиды, в разные моменты времени образует вогнутые встреч потока седловые поверхности, с predetermined скоростями смещения и деформации. Для приведения в движение цепной линии плавника применимы

¹⁸ «Корабль с плавниковым движителем». Патент № 2360831 от 10.07.2009 г. Бюл. № 19. Пер.№ 2007133624, от 07.09.2007 г., вх.№ 036721. ShipDesign.ru/Invent/03.html

различные механизмы гибкой шарнирной плети, группы коленчатых валов или линейных шаговых электродвигателей.

В позиции «**А - крыло**» – максимальная мгновенная скорость поступательного движения плавника при быстром изгибе его поверхности вблизи средней линии синусоиды. В этот момент плавник полностью распрямляется, создавая тягу от угла атаки плоского крыла. Концевая кромка с максимальной скоростью локального вращения гасит зарождение спутных вихрей с индуктивным закручиванием потока, характерного для жесткого крыла.

Позиция «**В - ротор**». В крайних положениях средняя линия с наибольшей кривизной на вершинах синусоиды, что в поступательном движении сбрасывает давление на внешней внутриседловой поверхности крыла, где к этому моменту концентрируются индуктивный вихрь с длиной задней кромки крыла. Быстрое распрямление седловой поверхности обращает отстающую по фазе циркуляцию вихря в поступательный поток тяги крыла.

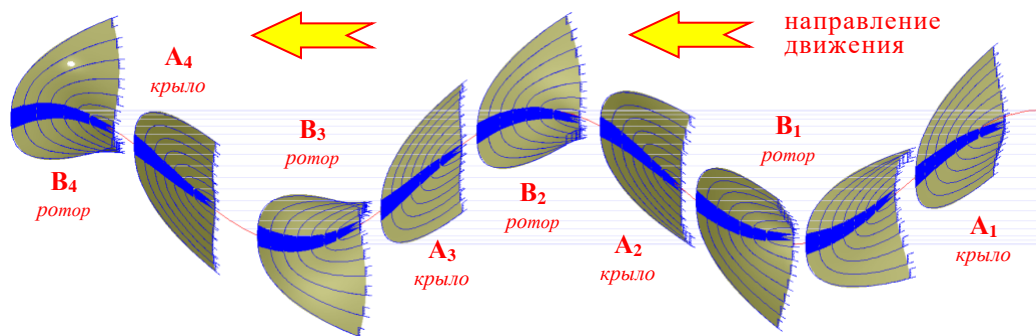


Рис. 26. Кинематика и сопутствующее изменение формы машущей поверхности симметричного гибкого плавникового движителя в движении по бегущей синусоиде в диаметральной плоскости за корпусом корабля. В позиции А – плавник подобен крылу, в позиции: В – ротору.

При выходе из положения «**В-ротор**» крыло быстро распрямляется 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 к моменту положения «**А-крыло**» все потоки вновь становятся сбалансированными по условно безвихревому маховому движению крыла.

При динамически корректируемом движении локальных секций плавникового движителя, он также будет действовать в качестве руля и активного успокоителя качки.

Поступательное перемещение плавника под действием вертикальной качки, при котором кинематика изменения формы крыла будет повторять геометрические поверхности для тех же фазовых отсчетов относительно деформированного волнением набегающего потока, плавник восстановит способности волнового движителя, использующего энергию волн для поддержания штормового маневрирование корабля с остановленными главными двигателями.

...

Для полноты освещения проблемы целесообразно в краткой форме упомянуть вариант достижения гидродинамической эффективности жесткого машущего крыла в профилированной насадке, в качестве основного движителя корабля. Совмещение свойств гидромеханики гибкого и жесткого крыла применимо в качестве активных гибких забортных плавников, служащих для плавного маневрирования или стабилизации хода корабля.

Заметим здесь, что эффективная стабилизация корпуса корабля возможна лишь при обеспечении минимальности силового воздействия со стороны штормового волнения. Оптимизированный корпус будет нуждаться в компенсации центробежных сил на циркуляции и постоянных кренящих моментов под действием ураганных ветров, для которых будет достаточно относительно слабых силовые реакции забортных плавниковых устройств.



«Жесткое машущее крыло без индуктивного вихреобразования, с реактивным сглаживанием спутных вихревых потоков – маршевый движитель корабля» (жесткое машущее крыло в профилированном коробе-насадке) [Судовой движитель]. Храмушин В. Н., Ганкевич И. Г. Патент № 2745044, бюл. № 8 от 2021-03-18

«Гибкое крыло с локальным приводом у борта корабля, плавниковый движитель – активный скуловой стабилизатор» (гибкий плавник) [Активный скуловой стабилизатор качки судна]. Храмушин В. Н., Богданов А. В., Дегтярев А. Б. Патент № 2749820, бюл. № 17 от 2021-06-17

... ..

...

Постановка и проведение прямых вычислительных экспериментов с кораблём в штормовом море

В интересах отработки ключевых решений по обводам и внешнему облику всепогодного корабля, ранее проводилась серия мореходных испытаний на интенсивном волнении в опытовых бассейнах Ленинграда и Комсомольска-на-Амуре, по результатам которых создавались проекты перспективных судов, строились и проводились целевые эксперименты с телеуправляемыми моделями на ветрах с интенсивным волнением в открытых морских и озерных акваториях Сахалинской области. Видеоматериалы испытаний и записи бортовой телеметрии к настоящему времени в целом систематизированы, частично отработаны и опубликованы в патентах России, в монографиях и других научных публикациях.

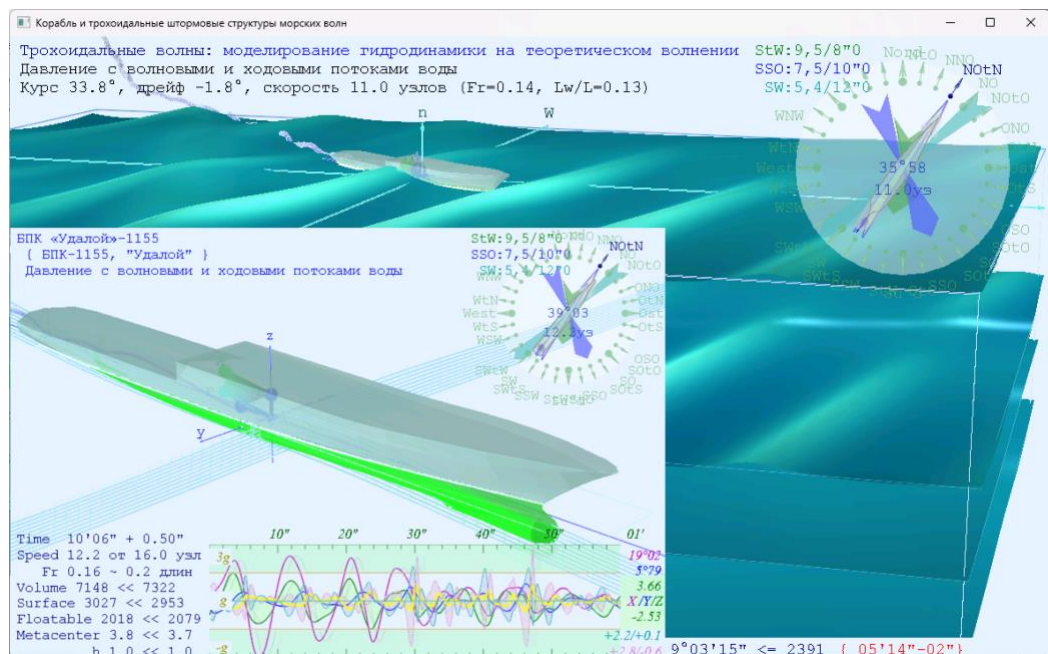


Рис. 27. В ходе вычислительного эксперимента задействуются два графических окна для представления морского волнения и корпуса корабля с метацентрическими отметками и графиками его динамики на волнении. На 30" и 37" фиксируется обратное ускорение свободного падения -0,6g, за которым следует удар под широкий транцевый кормовой подзор, с регистрацией перегрузки 2,8g.

Результаты опытовых экспериментов не охватывают все штормовые и опасные режимы плавания, хотя на завершающих этапах допускалась возможность морских катастроф под ударами крутых волн. Но всё же, случайные

аварийные ситуации не служат техническим обоснованиям еще и потому, что все испытываемые модели изначально проектировались по условиям повышенной штормовой мореходности. В ходе экспериментов также весьма существенны опасения по сохранности моделей и телеметрического оборудования, отчего возникает некая бессистемность телеметрических измерений на открытой воде, что в купе с малой прозорливостью и неверными предпочтениями экспериментаторов существенно снижает качество и обоснованность общих выводов по целевому проектированию корабля.

Правоверность заключений по вопросам штормовой мореходности перспективных и действующих кораблей может корректироваться по результатам прямых и визуально наглядных вычислительных экспериментов, где не существует ограничений на методичную отработку самых жестких и опасных сценариев штормового маневрирования корабля, где допустима тщательная поэлементная проверка математических моделей и методов моделирования, когда обоснованность выводов становится понятной как для корабельных инженеров, так и для специалистов в области морского дела с реальной практикой штормового плавания.

Управление ходом корабля выполняется с помощью тяги двигателя, направление движения регулируется фиксированной скоростью циркуляции: «по малу право/лево»; «руль право/лево» и «право/лево на борт». На ходу корабля возникает ходовой дифферент, дифферент при разгоне и торможении, включая возможность выхода на глиссирование, с проявлением потерь хода на штормовом волнении; захвате корпуса попутной волной. На циркуляции, при рыскании на курсе моделируются возникновение крена и другие эффекты качки и ходкости по всем шести степеням свободного маневрирования корабля.

На графиках (Рис. 27) приводятся вертикальная качка (зеленый график с закраской), величины крена (фиолетовый) и дифферента (синий), а также вертикальные ускорения в средней части корпуса (желтая кривая) и в его оконечностях (голубая с закраской). Управление ходом моделируемого корабля выполняется с любого из графических окон. На изображении с морским волнением осуществляется интерактивное перестроение групповых структур морского волнения и методов их моделирования. В окне с кораблем выполняются соответствующие настройки посадки, остойчивости, демпфирования корпуса и выбор модели гидромеханики силового взаимодействия корабля с морским волнением.

Особенности реализации штормовых опытовых и вычислительных экспериментов

Проведение вычислительного эксперимента в программном комплексе «Aurora» реализуется в интерактивной графической среде. Единообразие начальных условий задается с помощью файлов инициализации: *Aurora.vil (vessel-initiation+logging)* – для всей директории цифровых моделей, и «Имя-модели».vil – для конкретной модели корабля. В процессе вычислительного эксперимента такой файл конфигурации будет дополняться протоколом с результатами моделирования мореходности и управляемого маневрирования корабля в условиях морского волнения.

На начало вычислительного эксперимента мидель корабля приводится к волновым фазам с нулевыми амплитудами точно между групповыми структурами морского волнения, что необходимо во избежание не прогнозируемо больших нагрузок в начальные моменты времени.

Интенсивность силового воздействия штормовых волн на корпус корабля в наибольшей степени зависит от выбора курса и скорости хода относительно гребней групповых структур морского волнения. Нерегулярное волнение на море всегда нарушает симметрию волновых склонов от борта к борту корабля, образуя внешнее поперечное воздействие по схеме лагом к волне при движении произвольными курсами относительно гребней групповых структур трохоидального штормового волнения. Интенсивность качки выше уровня комфортности обитания на борту корабля заставляет судоводителя выбирать режимы штормования малыми ходами носом на волну, своеобразного способа вывода корабля из эксплуатации по основному предназначению.

Серию вычислительных экспериментов целесообразно начинать с опытов с поперечным волнением, в положении корпуса лагом к волне. Отметим лишь, что в принятой модели ячеистых групповых структур морского волнения, килевая качка с опасными захватами корпуса крутыми гребнями штормовых волн на курсах лагом к волне, также будут проявляться, и не в меньшей степени опасности для корабля.

Бортовые кили и крылья активных успокоителей качки

Интенсивность качки корабля в немалой степени зависит от возможности силового воздействия гребней штормовых волн на корпус корабля. Простейшим и крайне эффективным приспособлением и механизмом для такого раскачивания можно назвать бортовые кили и крылья активных бортовых успокоителей качки, подверженных прямому воздействию быстрых потоков воды в трохоидах под штормовыми волнами.

В ранее показанном патенте № 2360827 от 2007 года «Корабль без бортовой качки на волнении» [1] показаны варианты оптимального задействования бортовых килей (Рис. 6) в условиях специально отработанных для этого корабельных обводов крейсера «Аврора», в сравнении с условно современным крейсером «Варяг», для которого ключевые элементы корабельных обводов и забортные устройства действуют в опасную сторону, на усиление интенсивности всех видов качки.

Формально, забортные рули, активные крылья успокоителей качки, днищевые и бортовые кили отчасти увеличивают массу корпуса, никак не влияя на геометрическую статику относительно действующей ватерлинии, с небольшим уменьшением величины метацентрического радиуса и усилением турбулентного демпфирования динамики качки корабля, что совместно и чисто теоретически способствует плавности качки на тихой воде. Когда же отсчетом уровня тихой воды становятся крутые склоны штормовых волн, то вышеназванные проектные решения (опусы) объясняют лишь естественные ожидания интенсивных внешних силовых воздействий в темпе штормовых волн.

Первые сравнительные вычислительные эксперименты показывают, что в начальных фазах внешнего силового воздействия забортные кили повышают интенсивность динамических реакций, и лишь после угасания гребней штормовых волн, в соответствии с изначальным предназначением бортовые кили служат демпфированию бортовой качки корабля. Вышеназванным патентом (Рис. 6) показывается возможность оптимизации процессов гидромеханики на бортовых килях - успокоителях качки, поле которой возникает неоднозначность в оценках их эффективности в плане бортовой качки. В оценках влияния этих килей на ходкость, плавность рыскания на курсе, интенсивность килевой и вертикальной качки аксиоматика отрицательна, то есть в практическом плане возможно лишь снижении негативных последствий.

Это несколько затрудняет получение адекватных выводов из экспериментов с оценками плавности качки при малых размахах углов крена для реальных проектов кораблей и судов, для которых множество взаимозависимых процессов нестационарной гидромеханики элементарно не поддерживаются ни инженерными решениями, ни теоретическими познаниями. Сужая поисковые горизонты, сведём цели изысканий к обоснованию предположений об излишнем устройстве всех видов забортных успокоителей качки в средней части корпуса, которые безусловно и всегда подвергаются наибольшему воздействию скоростных потоков воды под гребнями штормовых волн, усиливаемых локальными смещениями элементов бортовой обшивки при интенсивной качке корабля.

Для начальной, и по возможности независимой от иных факторов оценки процессов гидромеханики вблизи бортовых килей, используем в качестве корабельных обводов удлиненную цилиндрическую бочку диаметром 10 метров и длиной 24 метра, с метацентрической высотой в 5% от ее ширины (50 см). Для сравнения вторая бочка будет обладать бортовыми плоскими киями нулевой толщины, то есть – без какой-либо дополнительной массы, влияющей на гидростатику и гидродинамику штормового плавания. Осадка строго по горизонтальному диаметру бочки, что должно минимизировать собственно влияние обводов предельно простого водоизмещающего корпуса. Плоскости килей устанавливаются под углом 45° симметрично по правому и левому бортам, и на всю длину испытываемой модели корпуса.

В вычислительном эксперименте, в программной среде «Аугога» не задействованы модели вязких течений жидкости, и, во избежание полной взаимокompенсаций давлений на бестелесных пластинах по парадоксу Даламбера, величина положительного отражающего импульса используется полностью, в то время как по обратной засасывающей стороне отрицательное давление по величине отчасти уменьшается, создавая качественно адекватный и строго фиксированный эффект от действия волновых сил¹⁹. Интегральная величина сил от давления на притягивающей стороне (отрицательного давления) может отличаться от их естественного проявления на бортовых киях корабля, гидромеханика которых более определяется масштабами выступающих частей и скоростями в локальных потоках жидкости.

¹⁹ Здесь использован коэффициент $k_v = 0$ – обнуление отрицательного давления в потоке притяжения строго по нормали к элементарной расчетной площадке.

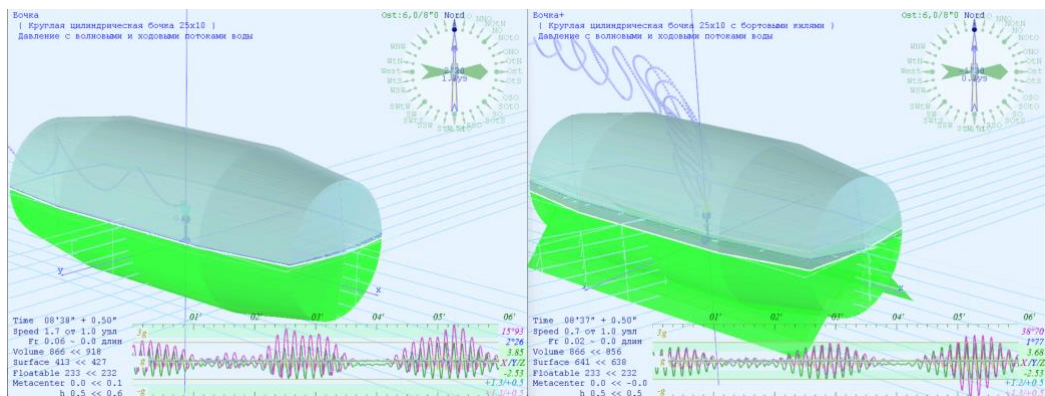


Рис. 28. Слева круглая цилиндрическая бочка на волне, справа она же, но с бортовыми наклонными киллями.

На рисунке выше синхронные вычислительные эксперименты с удлинёнными бочками на трохоидальном волнении с длиной 100 метров и периодом 8 секунд, с половинной от максимума высотой гребней девятых валов в шесть метров (6 м), что на метр (1 м) больше осадки модели, составляющей пять метров (5 м). Бортовые кили более чем вдвое увеличивают бортовую качку с 16° до 39°. Модель без килей сохраняет ходкость и устойчивость на курсе. Судя по кильватерному следу, модель с киллями топчется на месте со значительным дрейфом в сторону правого борта.

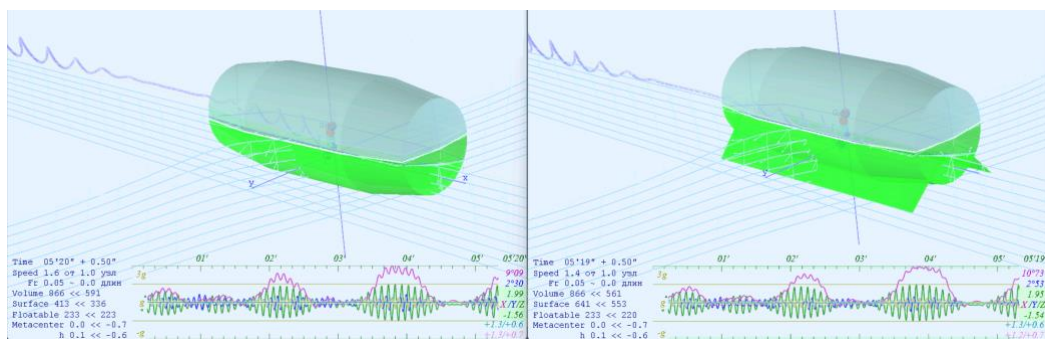


Рис. 29. Аналогичный синхронный эксперимент при длине волны 50 метров с высотой 3 метра, при этом метацентрическая высота водоизмещающего корпуса уменьшена до 1% ширины, и составляет 10 см.

Капитанская формула подсказывает собственный период качки порядка 11 секунд, что отображается на графиках небольшим запаздыванием фазы бортовых колебаний относительно килевой качки корпуса, которая должна

следовать строго в такт внешних волновых колебаний. Величины килевой и вертикальной качки, так же как и вертикальные ускорения в оконечностях для обеих моделей, в данном вычислительном эксперименте, можно считать вполне сопоставимыми.

В вычислительном эксперименте (Рис. 29) корпус модели выведен из такта бортовой качки на волне путем уменьшения метацентрической высоты до 10 см, что составляет 1% ширины корпуса. Внешнее воздействие гребней девятых валов уменьшено пропорционально длине до 50 метров и высоте до 3 метров, с периодами вол до 5,7 секунд. Собственный период колебаний корпуса теперь достигает порядка 32 секунд.

Синхронный вычислительный эксперимент показывает вполне сопоставимые по форме результаты, но всё же максимальные углы крена модели с бортовыми киями увеличивается с $9^{\circ}1$ до $10^{\circ}73$, что на 15% больше чем у чистого бочонка без выступающих частей.

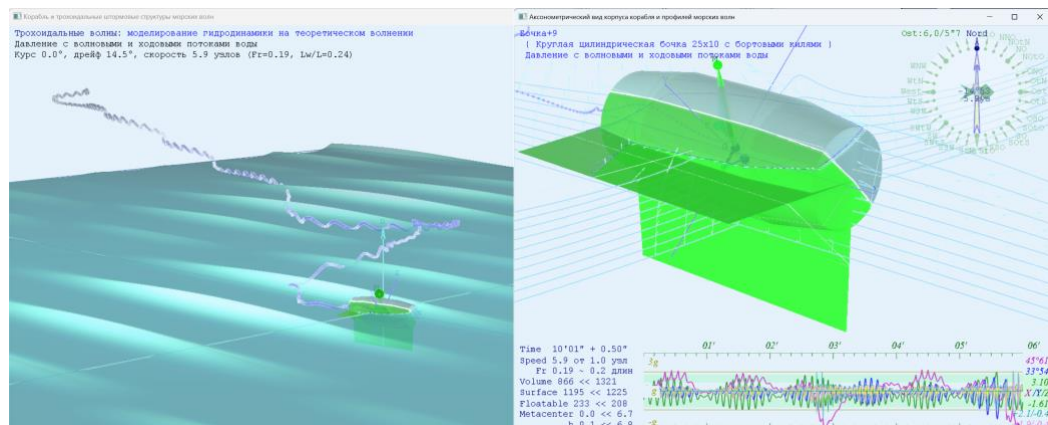


Рис. 30. Вариант опытов с бортовыми киями значительно большей площади.

В дополнительном эксперименте по экстремальной динамике плавания (Рис. 30) в 2,5 раза увеличивается выступ бортовых килей, и удваивается до максимума в шесть метров высота волн с тем же периодом в 5,7 секунд. Остойчивость держится на уровне 0,1 метра метацентрической высоты, так как эксперименты с увеличенной до 0,5 метра метацентрической высотой отличаются лишь более частым гидродинамическими ударами, без особого видимого различия в штормовой динамике удлиненной бочки с большими бортовыми киями. Положительного влияния больших бортовых килей в принципе никогда не наблюдается. Огромные углы крена превышают 50° с дифферентом более 33° , что свидетельствует лишь о частых захватах корпуса гребнями волн, после которых

модель сбивается с курса, испытывает бродяжничество, дельфинирует или получает сокрушительные гидродинамические удары по выбрасываемым воды бортовым киям. Можно лишь отметить, что вертикальная качка не превышает в размахе 4,8 метров, что меньше высоты гребней девятых валов в 6 метров.

Аналогичный эксперимент без бортовых килей показывает вполне плавную качку, без резких движений и ударных нагрузок. При этом возможен аналогичный захват корпуса гребнями крутых волн, иногда возникает сильное отклонение от курса с плавным возвратом к заданному направлению движения, но при этом в ходе вычислительного эксперимента не наблюдается ускорений в оконечностях более чем 0,5 g.

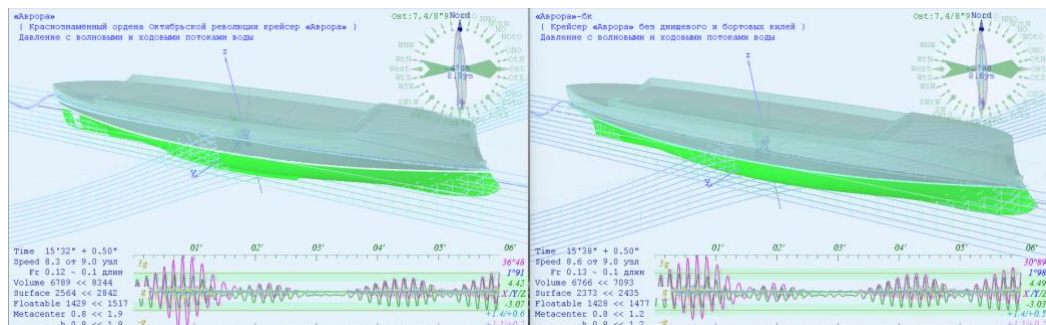


Рис. 31. Синхронный вычислительный эксперимент с мореходными испытаниями «Аврора» с чистым корпусом справа, с днищевым и бортовыми киями, и с кормовым рулём управления – слева.

Специальным вычислительным экспериментом (**Рис. 31**) с цифровой моделью крейсера «Аврора» без выступающих частей ниже ватерлинии, и в варианте с днищевым и бортовыми киями, а также с кормовым рулём управления, также участвующим в асимметричном силовом взаимодействии с трохoidalными структурами морского волнения. Длина одиночных волн в групповых структурах устанавливается равной длине крейсера в 124 метра, с периодом 8,9 секунд, и высотой девятых валов в 50% от максимума 7,38 метров. Начальная метацентрическая высота корабля выбирается по упоминаниям об океанском плавании «Авроры», это порядка 0,8 метров, с собственными периодами бортовой качки порядка 15 секунд.

Несмотря на большую на 23 тонны (+0,34%) массу корпуса корабля с установленными рулем и объемными киями, в синхронной гидродинамике моделей повсеместно наблюдаются неблагоприятные эффекты. Бортовая качка возрастает с 30°9 до 36°5, что составляет превышение по максимальному крену 18%, при этом на графиках отмечается больший размах качки на другом борту.

Небольшое увеличение наблюдается по килевой и вертикальной качке, также как и по вертикальным ускорениям в оконечностях.

По умолчанию в вычислительном эксперименте программного комплекса Аугога используется коэффициент снижения отрицательного давления $k_v = 0,5$, при котором аналогичные синхронные опыты показывают различия в максимальных углах крена по крейсеру «Аврора» в пределах одного процента ($\Delta < 1\%$). При этом тенденция к различию параметров мореходности, форма графиков качки и симметрия углов крена на увеличение размаха бортовой качки корпуса с килями в полной мере повторяется.

То есть, предположение о корректности проведения оптимизационных опытов по форме корпуса корабля без учета бортовых – демпфирующих²⁰ успокоителей качки при факторе взаимокompенсации отрицательных давлений $k_v = 0,5$, можно полагать вполне допустимым.

Гидродинамическое качество обводов корпуса крейсера «Аврора» определённо можно считать весьма высоким, и потому формально незначимые гидродинамические помехи заметно сказываются на параметрах его мореходности. Фактически это же означает, что корпус крейсера вполне может воспринимать относительно слабые управляющие воздействия, например, с использованием активных успокоителей качки не особо большой громоздкости. Однако для экспериментальной проверки таких возможностей активного воздействия на мореходность корабля, всё же, нет особой необходимости в нагромождении столь тяжелых забортных выступающих частей.

Безусловно, установка бортовых килей и крыльев активных успокоителей качки влияет на мореходные качества корабля в штормовых условиях плавания. Однако, в последующих вычислительных экспериментах в мореходных испытаниях участвуют реальные и перспективные корабли и суда без каких-либо выступающих частей, так как главными целями настоящих корабельных изысканий является оптимизация именно и только форма корпуса. Отработка процессов гидромеханики бортовых килей всё же должна выполняться, но только после построения наилучшей по мореходным качествам формы корпуса, и лишь в таком случае активные успокоители качки смогут и будут помогать судоводителям в поддержании обосновании режимов хода.

²⁰ Взаимокompенсация давления в случае внешних сил, как подводные крылья или кавитирующие подводные реданы, поддерживается в долях от коэффициента k_v .

Мореходные испытания кораблей перспективного и

действующего флота

В вычислительных экспериментах варьируются параметры состояний корабля и штормового моря, всего 360 опытов на каждую числовую модель:

$K \{ 4 \}$ – курс относительно гребней штормовых волн: 0 – носом на волну; 30 – вразрез волне; 90 – лагом к волне; 150 – в бакштаг;

$V \{ 5 \}$ – 0 – без хода; стандартные 9 узлов; и по Фруду: $F_n \approx 0,22_{\min}$, $0,24^{\max}$, $0,26_{\min}$, $0,3^{\max}$, $0,33_{\min}$, $0,48^{\max}$ и 0,8 - контрольный, строго по экстремумам на кривой волнового сопротивления – интенсивности волнообразования;

$\lambda \{ 3 \}$ – длина ветровой волны отмеряется относительно конструктивной ватерлинии, отмеченной в описании в цифровой модели $\lambda = 0,5 \cdot L$ и $\lambda = 1,0 \cdot L$;

$\zeta \{ 3 \}$ – высота волны задаётся в долях от максимума теоретически возможной высоты гребня девятого вала: $A = 0,25$; 0,5 и 1,0, с пропорциями по трём групповым структурам трохойдальных волн: $A = 1,0$ на S – для ветровой волны; $A = 0,4$ на SWtS – волн зыби; и $A = 0,2$ на S0tS – реликтовых валов, соответственно.

$h \{ 2 \}$ – метацентрическая высота устанавливается в долях ширины корпуса: $h=0,0$ и 5%.

Имя	$L_{\text{КВЛ}+\text{макс}} / B_{\text{КВЛ}+\text{макс}} / T_{\text{макс}}$	$W / S / \delta$	Δh
Крейсер «Аврора»	$124_{+3} / 16,8 / 6,4$	$6758,2 / 2355 / 0,508$	0,46
Корвет А–1201	$88,6_{+1,4} / 9_{+1} / 4_{+1}$	$1863,3 / 1004,8 / 0,584$	0,30
МИДВ-1985(%2)	$116_{+14} / 10,7_{+5,3} / 8$	$7520,8 / 2786,5 / 0,756$	1,40
Steamship «Victory»	$135,3_{+3,4} / 18,9 / 8,53$	$14627 / 2750,3 / 0,672$	0,32
Лидер «Ташкент»	$134_{+6} / 13,7_{-0,6} / 3,98$	$2957,4 / 1630 / 0,422$	0,03
Крейсер «Варяг» –58	$134_{+9} / 15,2_{+0,9} / 4,5$	$4460,3 / 2081,4 / 0,487$	-0,76
«Стерегуший» – 61	$133_{+11} / 14_{+1,8} / 4,47$	$4319,6 / 2047,4 / 0,515$	0,19
«Буревестник»–1135	$113_{+10} / 13,2_{+1} / 4,2_{+2,68}$	$2915,1 / 1609,7 / 0,487$	-0,34
5415 US Navy	$142_{+11} / 19,1_{+1,4} / 6,15_{+3,02}$	$8418 / 2975,6 / 0,507$	-1,00
ONR-5613 (DDX)	$154_{+2} / 18,8 / 5,49_{+2,1}$	$8524,4 / 3197,4 / 0,536$	-0,88

L – длина корпуса по ватерлинии + добавка до максимальной [м]

B – ширина по ватерлинии + добавка до максимальной [м]

T – расчетная осадка [м]

W – водоизмещение на тихой воде [м³]

S – площадь смоченной обшивки [м²]

δ – коэффициент общей полноты [δ]

Δh – максимум по S-образной диаграмме, или – отрицательная h [м]

Планом сравнительных мореходных испытаний в качестве базового проекта наиболее мореходного корабля выбирается крейсер «Аврора», в предположении, что новые перспективные проекты покажут отчасти превосходные результаты, и корабли действующего флота – как есть.

Все мореходные вычислительные эксперименты проводятся на нерегулярном волнении с размерением относительно наиболее крутых ветровых волн. Волны зыби по длине 1,75 и высоте 0,4 от ветровых волн, и реликтовые валы по длине 2,5 и высоте 0,2, соответственно.

Группировка вычислительных экспериментов выполняется по двум параметрам: курсу и скорости хода. При установке параметров испытываемые модели должны синхронно проходить по одинаковым групповым структурам морских волн, по мере возможности сопоставления результатов при сравнимом разгоне, скорости хода и поддержания курса в условиях синхронных и соизмеримых по величинам углах рыскания.

Для всех числовых моделей первые опыты выполняются с нулевой метацентрической высотой для оценок качества проектирования обводов и формы корпуса корабля в целом. В отличие от тихой воды, в условиях морского волнения обретается некий полезный запас остойчивости, который слабо проявляется в гидростатике на тихой воде.

$$V = Fn \cdot (g \cdot L)^{1/2} \cdot 3600 / 1852,6 = 6,0865 \cdot Fn \cdot L^{1/2}. \text{ [узл]}$$

Имя	9 узл. =Fn	Скорость по Фруду Fn → в узлы							L _{KWL}
		0,22	0,24	0,26	0,3	0,33	0,48	0,8	
Крейсер «Аврора»	0,133	14,91	16,27	17,62	20,33	22,37	32,53	54,22	124
Корвет А–1201	0,157	12,6	13,75	14,9	17,19	18,91	27,5	45,83	88,6
МИДВ-1985(%2)	0,137	14,42	15,73	17,04	19,67	21,63	31,47	52,44	116
Steamship «Victory»	0,127	15,58	16,99	18,41	21,24	23,38	33,98	56,64	135,3
Лидер «Ташкент» Крейсер «Варяг» –58	0,128	15,5	16,91	18,32	21,14	23,25	33,82	56,37	134
«Стерегущий» – 61	0,128	15,44	16,85	18,25	21,06	23,16	33,69	56,15	133
«Буревестник»–1135	0,139	14,23	15,53	16,82	19,41	21,35	31,06	51,76	113
5415 US Navy	0,124	15,96	17,41	18,86	21,76	23,93	34,81	58,02	142
ONR-5613 (DDX)	0,119	16,62	18,13	19,64	22,66	24,93	36,26	60,43	154

Последовательно рассматриваются особенности штормового маневрирования корабля в рамках приведенной классификации гидрографических условий на открытых морских акваториях.

Нестационарное трохoidalное волнение на глубокой воде характеризуется динамической особенностью распространения видимых фронтов волн с удвоенной скоростью относительно собственно скорости передачи волновой энергии. Внешне это проявляется регулярным и последовательным отставанием фазы видимых волн, что можно пояснить как бы непрерывным отражением от условно невозмущенной водной поверхности перед волной. Как следствие возникает интерференция с условно отраженными волнами, отчего регулярно проявляются девятые валы, которые в записях килевой качки корабля проявляются со строгой регулярностью. Девятые вала проявляются в динамике стоячих волн, что допускает и нередко проявляется крутизной волны более 30° , при этом протяженность фронта увеличивается в случае уменьшения крутизны девятого вала. Внешне поверхность штормового моря формируется ячеистыми структурами фазовых волн с девятью валами в центре, сосуществующими в суперпозиции со свободными волнами от ранее действовавших ветров, и характерной для данной акватории длиннопериодной зыби. Обрушение гребня штормовой волны означает достижение вертикального ускорения величины свободного падения, с заметным снижением давления в потоке в соответствии с законом Бернулли.

Примечательной особенностью штормовой акватории является очень длительное время существования особо высоких и заметных издалека девятых валов, что позволяет судну не ходить «по кочкам», заблаговременно уклоняясь от встречи с такими девятью валами небольшими изменениями курса. В центре циклона практически все крупные волны динамически стоячие, отчего качка получается как бы «на качелях», без избыточных перехлестов гребней штормовых на верхнюю палубу судна. Гребни волн до и после девятого вала быстро движутся, т.е. являются прогрессивными с вдвое меньшей крутизной фронта. Сопровождающие волны обладают весьма большой кинетической энергией, и могут либо подбросить судно, после чего в падении произойдет занывивание под девятый вал, либо в результате «дельфинирования» с девятого вала произойдет сильнейший встречный удар по корпусу и надстройкам корабля.

Современный корабль может двигаться любым курсом относительно штормового волнения на глубокой воде, при этом лагом к волне будет достигаться максимальная скорость хода под огромными размахами бортовой качки; либо предельно малыми ходами носом на волну; либо по волне на среднем или полном ходу для поддержания управляемости над гребнями опережающих судно штормовых волн. Современные корабли и грузовые суда нуждаются в выборе оптимального штормового курса, для них широкая транцевая корма и огромный надводный объем в носовой части корабля способствуют превышению ускорения свободного падения и невесомости в оконечностях корпуса. Примером корабля повышенной штормовой мореходности является крейсер «Аврора».

Относительно мелкая вода характерна для входов в морские порты, для морских рейдов, якорных стоянок, рыболовных банок и относительно узких проливов. Штормовые волны в таких акваториях вытягиваются протяженными гребнями, которые преобразуются из трохоидальных волн в длинные волны с кноидальными гребнями, и пронизывают общим потоком всю толщу воды. Примечательно, что штормовые волны на малых глубинах из групповых структур преобразуются в регулярные прогрессивные волны, и потому крутизна гребней уже не может превышать 30° , однако кинетическая энергия горизонтального перемещения становится предельно максимальной. Интенсивность вихревого движения в гребнях кноидальных волн значительно повышает опасность плавания лагом к волне для судов малого и среднего водоизмещения. При движении носом на волну требуется крепление всех грузов по штормовому, так как превышение ускорения свободного падения в носовой оконечности становится весьма вероятным. В морской практике известны многочисленные примеры гибели судов в результате бросинга, когда на малых ходах попутная волна обращает действие руля на обратное, отчего происходит быстрый разворот под интенсивный вихрь догоняющей волны.

Практически безысходная по опасности ситуация возможна для среднетоннажных судов на интенсивном волнении на ходу над морскими банками или вблизи прибрежных мелководий. Здесь рефрагирующие в сторону отмелей морские волны разделяются на кноидальные гребни – волновые солитоны, крутизна которых в целом хоть и не превышает теоретических 30° для прогрессивной волны, однако в движении с глубокой воды к береговому урезу вершина волны стремится к опрокидыванию, формально достигая бесконечной крутизны с сильно закрученными потоками воды в обрушающемся гребне. Скорость потока воды в вершине обрушающейся волны может превышать её

фазовую скорость, что является угрозой бортового слеминга с «захватом» или «подбрасыванием» оконечностей судна с ударными ускорениями, превышающими ускорение свободного падения. Конструктивно столь опасные эффекты могут предотвращаться устройством зауженной крейсерской кормы и заваленного в корму форштевня с относительно малыми объемами надводного корпуса корабля в оконечностях. Весьма важным элементом формы корпуса также является штормовой подрез в нижней части форштевня, ...

При движении в сторону берега целесообразно поддерживать самый полных ход, что позволит поддерживать управляемость в ожидании быстрого рассеяния энергии идущего к берегу гребня волны, а при явном захвате корпуса попутной волной постараться держать руль прямо до восстановления нормального обтекания корпуса встречным потоком воды.

Резюме:

Морская практика и вычислительные эксперименты по моделированию штормового волнения позволяют систематизировать и обосновать режимы эффективные штормового плавания судов в различных гидрометеорологических и навигационно-гидрографических условиях, что полезно к представлению в наставлениях мореплавателям, в экспертных и автоматических системах управления судном в реальных условиях мореплавания.

«Азербайджан»	140 ₊₁₆ / 22 / 5.89	10261 / 3021,3 / 0,566	-,15
---------------	--------------------------------	------------------------	------

Управляющая строка «Гидромеханика» (или «Fluidmechanics») – выбор вычислительной модели гидромеханики корабля в условиях морского воления. ...

.....
..... вычислительные эксперименты – проектно-технические решения для корабля повышенной штормовой мореходности и наставления по выбору курса и скорости хода корабля для достижения наилучшей ходкости и/или обитаемости на борту корабля в штормовых условиях плавания.
###

Групповые структуры трохоидаьных волн на море и особенности штормового кораблевождения (+++)

Постановкой вычислительного эксперимента предусматривается практическое моделирование штормового волнения и его воздействие на корпус корабля лишь в той мере, которая оказывает существенное влияние на гидромеханику трансформации волновых процессов в чувствительных для динамики корабля масштабах. В качестве базовой физической модели выбирается трохоидаьное волнение с обрушающимися гребнями «девярых» валов, опасность которых отмечается мореплавателями.



Рис. 32. Испытание телеуправляемой модели в условиях прибойного волнения. При выходе на мелководье протяженность фронтов штормовых волн вытягиваются, при этом крутизна гребней значительно возрастает. Любый режим маневрирования в таких условиях, особенно если обводы корпуса специально не оптимизированы для штормового плавания, становится чрезвычайно опасным

В рамках трохоидаьной теории поле скорости и геометрическая форма гравитационных волн на глубокой воде оценивается параметрическим описанием

траекторий частиц жидкости, движущихся в лагранжевых (локальных) координатах по циклоидам с переменным радиусом:

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

$$z_w(a, x, z) = z + a \cdot \cos(x \cdot 2\pi / \lambda) \cdot e^{2\pi \cdot (z + a \cdot \cos(x \cdot 2\pi / \lambda) - a) / \lambda},$$

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: $0 < a \leq 1,0$; $z \leq 0$.

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. 32). «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.

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

На глубокой воде трохоидальные волны объединяются в групповые структуры с образованием девятых валов существенно большей высоты, но менее опасных по силовому гидродинамическому воздействию, т. к. наиболее крупные волны теряют скорость 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: $a' = a / 1,286$.

$$x_G = x_w - a' \cdot \sin(x' \cdot 2\pi / \lambda) \cdot e^{2\pi \cdot (z + a' \cdot \cos(x' \cdot 2\pi / \lambda) - a') / \lambda};$$

$$z_G = z_w + a' \cdot \cos(x' \cdot 2\pi / \lambda) \cdot e^{2\pi \cdot (z + a' \cdot \cos(x' \cdot 2\pi / \lambda) - a') / \lambda},$$

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 проявляет себя 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 занывивания носовой палубы под волну, на высокой скорости скатывания с большой волны и сильным носовым дифферентом.

Особенности штормового кораблевождения

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.

В практическом судовождении ориентируются на традиционные модели штормового волнения, 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 мимо корабля, и лишь после этого возможно прямое столкновение с особо крупной штормовой волной (если рулевой специально не ведет корабль «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.

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.

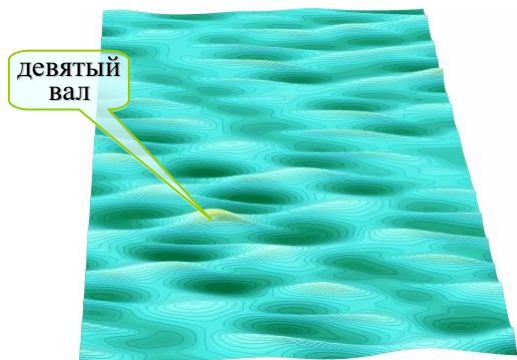


Рис. 33. Ячеисто-групповая структура морского волнения на глубокой воде, составленная по стандартным данным о волнении судового метеопоста: ветровое ($\lambda = 60\text{м}$, $\tau = 6,2\text{с}$, $h = 7,2\text{м}$, $A = 250^\circ$); первая и вторая системы зыби ($\lambda = 100\text{м}$, $\tau = 8,0\text{с}$, $h = 5,9\text{м}$, $A = 210^\circ$ 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.

Трехмерная ячеистая модель групповых структур трохноидального волнения на глубокой воде (Рис. 33) удовлетворяет законам гидромеханики волн большой высоты [Л], 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, 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.

В ночное время визуальное определение параметров волнения становится затруднительным. Современная высокоточная измерительная техника позволяет получать необходимые характеристики волнения, включая выработку

кратковременных прогнозов воздействия наиболее высоких и опасных гребней волн, с помощью автоматических информационно-вычислительных систем.

В качестве простого и надежного регистратора волнения может выступать сам корпус корабля. По рисунку 10 можно отметить синхронность изменения углов килевой и бортовой качки, измеряемой бортовыми инклинометрами, и пульсаций скорости хода, определяемых по приращению географических координат судна. Параметры собственных вертикальных колебаний, рыскания и качки могут быть оценены по текущей весовой загрузке корабля и прямым вычислениям гидростатических и гидродинамических параметров гидромеханики судна в режиме реального времени. Систематические погрешности вычислительных экспериментов должны адаптироваться к большим углам крена и дифферента по реальным записям регистрирующих приборов (**Рис. __**), что также необходимо для уточненной оценки параметров морского волнения. На относительно слабом волнении такое уточнение может быть выполнено с помощью процедуры идентификации параметров дифференциальных уравнений качки корабля.

Простая и быстрая оценка параметров наиболее действенных для корабля штормовых волн может быть сделана по записям килевой качки судна, которая, ввиду малости периода собственных колебаний в точности прописывает форму морских волн, соизмеримых с длиной корабля. Для уточненного измерения характеристик относительно короткого волнения необходимо использование одного или нескольких заборных волнографов.

Анализируя принятую модель штормового волнения, можно сделать вывод о том, что для восстановления реальной картины волнообразования необходимо провести замеры килевой качки корабля в секторе курсов не превышающем $\pm 30^\circ$. В штормовом плавании в таком же секторе происходит естественное рыскание корабля на курсе, что обычно не представляет дополнительных угроз для безопасности штормования. Сектор курсов для маневрирования при отклонении от девятых валов находится в пределах $\pm 15^\circ$, что вполне достижимо по времени реагирования движущегося судна при своевременном переключении руля.

Путевая регистрация и анализ параметров качки и пульсаций скорости хода, сопоставление их с нагрузкой на движителях и динамикой переключений руля, создают необходимую информационную базу для оптимизации хода судна в условиях умеренного волнения и для поиска обоснованных решений при выборе безопасных режимов штормового плавания. По мере накопления данных о штормовой динамике судов с различными обводами, они могут быть

использованы при поиске оптимальных проектных решений о форме корпуса и общекорабельной архитектуре новых кораблей. Это особенно важно для специализированных проектов судов, в которых функциональные требования к бортовому оборудованию или к условиям морского базирования не могут быть в полной мере согласованы с требованиями безопасности в штормовом плавании.

Технические предложения по оптимизации мореходных качеств корабля в штормовых условиях плавания

Прямые вычислительные эксперименты по моделированию штормового плавания конкретного корабля, с возможностью визуализации гидромеханики взаимодействия с одиночными гребнями или пакетами крупных волн в масштабе реального времени, могут служить опытовым обоснованием к техническим предложениям в проектировании перспективных кораблей и судов повышенной штормовой мореходности, и столь же полезны в составе бортовых штурманских счетно-решающих устройств или экспертно-информационных систем в морских службах капитанов-наставников, для синтеза оперативных рекомендаций мореплавателям в сложных и штормовых условиях мореплавания.

Экспериментальная вычислительная среда обладает полноценной трёхмерной визуализацией всех структур морского волнения, с траекторией перемещения и мгновенного позиционирования виртуальной модели корабля в охвате морских волн, с визуализацией гидродинамических центров и действующих метацентрических параметров мгновенной остойчивости.

Стандартные графические средства OpenGL дают возможность настройки прозрачности морских волн с выбором вариантов сплошных или контурных прорисовок судовых обводов и надводной архитектуры корабля, что дает судоводителю возможность наглядного анализа и заблаговременного прогноза условий и эффективности штормового хода, в том числе для предотвращения потенциально опасных или аварийных ситуаций в открытом море.

Новый инструментарий открывает актуальное направление исследований в области корабельной гидромеханики, значимыми достоинствами которого являются вполне оптимальные требования к объемам оперативной памяти и вычислительной производительности компьютеров, что позволяет рекомендовать новые программные комплексы к широкому использованию в производственных и конструкторских изысканиях; в исследовательских и академических целях.

Список рисунков

- Рис. 1.** Проекция бок и корпус теоретических контуров эллипсоида (сверху-слева); для диаграммы остойчивости (слева-внизу) при фиксированном положении центра тяжести (Z_g) и правее – при нулевой начальной метацентрической высоте ($h=0$), и левее – при ($h=1\text{ см}$) одной тысячной от ширины корпуса ($h=0,1\%B$); справа кривые элементов теоретического чертежа: $zC[\text{м}]$ – аппликата центра величины; $zM \equiv 5[\text{м}]$ – аппликата метацентра; $V[\text{м}^3]$ – грузовой размер; $S[\text{м}^2]$ – смоченная поверхность корпуса; $Sw[\text{м}^2]$ – площадь действующей ватерлинии; $xC=0, xS=0[\text{м}]$ – абсциссы центра величины и центра ватерлинии; $r, R[\text{м}]$ – поперечный и продольный метацентрические радиусы; $Jx, Jy[\text{м}^4]$ – моменты инерции площади действующей ватерлинии относительно продольной и поперечной осей корпуса.8
- Рис. 2.** Контур корпуса куба (сверху-слева); и его диаграммы остойчивости (слева-внизу) при фиксированном положении центра тяжести (Z_g) и нулевой начальной метацентрической высоте ($h=0$); справа гидростатические кривые элементов теоретического чертежа.10
- Рис. 3.** Вариант расчетов остойчивости формы корпуса для развала борта – слева; вертикальных бортов – по центру; и завала бортов – справа. Диаграммы построены для фиксированного положения центра тяжести (Z_g) и нулевой начальной метацентрической высоты ($h=0$), и уменьшенного до 40% диапазона осадок $3\div4$ – на всплытие, и $6\div7$ ватерлиний – на погружение корпуса при вертикальной качке.11
- Рис. 4.** Вариант расчетов остойчивости формы корпуса для цилиндрического корпуса – слева; корпуса кубической полноты со «струйной системой» обтекания по Алымову – в центре; и тот же корпус со скуловыми гашением корабельных и внешних штормовых волн – справа. Диаграммы построены для фиксированного положения центра тяжести (Z_g) и нулевой начальной метацентрической высоты ($h=0$), и уменьшенного до 40% диапазона осадок $2\div4$ – на всплытие, и $6\div9$ ватерлиний на погружение корпуса в условиях вертикальной качки.12
- Рис. 5.** Сверху изображены три варианта проекции корпус для теоретических чертежей с диаграммами остойчивости формы корпуса кораблей, ниже, для различных осадок при фиксированных положениях центра тяжести (Z_g) и нулевой начальной метацентрической высоте ($h=0$): **А**-«Корвет» – корабль повышенной штормовой мореходности; **Б**-«Аврора» – исторический прототип корабля, как образец морской грамотности и хорошей морской практики в проектировании корабельных обводов; **В**-«Буревестник» – современный корабль с традиционным сильным развалом борта и развесистыми ветвями надводных шпангоутов. Красная кривая на диаграммах остойчивости соответствует конструктивной осадке [ВЛ], зеленые по ватерлиниям $[3\div4]$ – при всплытии, и синие $[6\div7]$ – при погружении в динамическом процессе в условиях вертикальной качки.14
- Рис. 6.** Характер гидродинамического воздействия морского волнения на корпус корабля показывает различия в перераспределении кренящих гидродинамических сил А) – перспективного, слева, и Б) – современного, справа кораблей. Кренящий момент от прямого воздействия волнового гребня на надводный борт компенсируется завалом борта, а длинная вдолькорпусная надстройка на верхней палубе и бортовые кили способствуют компенсации остаточного кренящего момента. В случае развала бортов все кили и распределение давлений в подводной части корпуса усиливают кренящий момент под воздействием морского волнения, а возникающий дрейф усугубляет лишь негативный эффект. В целом, по схеме А)

достигается полная компенсация кренящих моментов, по схеме Б) – все внешние силы действуют в сторону образования крена на подветренный борт.	19
Рис. 7. 1) – гидростатические характеристики корпуса корабля, построенного по результатам обобщения серии мореходных экспериментов в опытовом бассейне кафедры теории корабля Ленинградского кораблестроительного института в 1985 году.	23
Рис. 8. 2) - остойчивость формы и кривые элементов теоретического чертежа (КЭТЧ) торпедного катера типа «Г-5» проекта ЦАГИ 1928 года.	25
Рис. 9. 3) – гидростатические характеристики и диаграммы остойчивости предварительного проекта современного корабля «ONR-5613 Tumblehome ship». Левый чертеж корпуса по конструктивной осадке, ниже под ним диаграммы остойчивости формы корпуса $h = 0$, правее по центру те же диаграммы с фиксированием центра тяжести корабля на два метра ниже: $h = 2$ м. Справа тот же корабль с осадкой на два метра большей, с диаграммами остойчивости формы корпуса $h = 0$	26
Рис. 10. Волнообразование, как процесс отражения волн от поверхности корпуса корабля. В зонах A_{+S} и S_{-B} происходит рост гребня трохoidalной волны, неспособной оторваться от корпуса судна.	33
Рис. 11. Слева кривые коэффициентов волнового сопротивления C_w , и удельного по отношению к водоизмещению волнового сопротивления R/W [Н/кг]. Справа теоретические (расчётные) шпангоуты в проекции корпус.	35
Рис. 12. Слева кривые коэффициентов волнового сопротивления C_w , и удельного по отношению к водоизмещению волнового сопротивления R/W [Н/кг]. Справа теоретические (расчётные) шпангоуты в проекции корпус.	35
Рис. 13. Вычисление волнового сопротивления; интенсивности излучения и интерференции корабельных волн вдоль корпуса опытовой модели 1979-1980 гг.	36
Рис. 14. Аналогичные оценки интенсивности корабельного волнообразования и волнового сопротивления для модели 1987 года, обладающей скуловыми сужениями в носовых и кормовых обводах при сопряжении потоков воды между бортовыми и днищевыми поверхностями.	37
Рис. 15. Лидер эсминцев «Ташкент» итальянской постройки.	38
Рис. 16. Атомный крейсер «Киров» с эквидистантными и расходящимися ватерлиниями в районе носовой скулы. В правой части приведен фрагмент теоретического чертежа по носовой оконечности в проекциях бок и полуширота.	39
Рис. 17. Гидромеханика килевой качки интерпретируется с использованием исторического понятия волнообразующей – волновоспринимающей длины корпуса $L(\text{wave})$, за пределами которой на $L(kwl)$ корпус подпадает под прямые удары прогрессивных трохoidalных волн, где скуловые обводы и относительно низкий надводный борт должны способствовать стабилизации качки	41
Рис. 18. Носовая часть корпуса быстроходного корабля, способного активно маневрировать в условиях ураганных ветров, штормового волнения и автономного плавания в обстановке средней ледовой сплошности.	43
Рис. 19. Носовая часть корпуса тихоходного транспортного судна, способного удерживать заданное направление движения относительно малыми ходами в условиях ураганных ветров, штормового волнения и автономного судоходства в ледовой обстановке средней сплошности	43
Рис. 20. Кормовая скула, подзор, раковина и ахтерштевень одновинтового корабля, оптимизированные по условиям снижения ходового дифферента и корабельного волнообразования.	47

- Рис. 21.** Кормовая скула, подзор, раковина и ахтерштевень двухвинтового корабля.48
- Рис. 22.** Вариант 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.53
- Рис. 23.** Формирование общекорабельной архитектуры рыболовного судна с предельно низким надводным бортом для обеспечения эффективной и безопасной работы траловой команды в условиях штормовых ветров и интенсивного волнения на море. Необходимый запас плавучести обеспечивается включением в герметичный контур корпуса носовой надстройки и палубных тамбучин.54
- Рис. 24.** Винторулевой комплекс с вертикальным рулем (3) и горизонтальными крыльями активных успокоителей килевой и бортовой качки (4), которые в случае остановки гребных винтов (2) автоматически обретают режим аварийных штормовых движителей. 1 – корпус корабля; 4 – стабилизирующее крыло, справа вариант с поворотными насадками; 5 – баллер установлен строго на линии балансирной оси в потоке за гребным винтом, и допускает упругий поворот на угол $\pm 30^\circ$; 12 – центр площади крыла, к которому сводится суммарная сила (13) при вертикальной качке кормовой оконечности; 14 – угол упругого поворота плоскости крыла.56
- Рис. 25.** Воздействие гребней штормовых волн (7); уровень склона волны вблизи корпуса корабля (8), и кренящий момент (9) их суммарного воздействия. Синхронная перекладка правого крыла (10-R) на погружение и левого крыла (10-L) – на всплытие, создают необходимую пару сил (11) для компенсации воздействия внешнего кренящего момента. Форма и положение центра площади крыльев могут быть настроены на автоматическую компенсацию крена на циркуляции.57
- Рис. 26.** Кинематика и сопутствующее изменение формы машущей поверхности симметричного гибкого плавникового движителя в движении по бегущей синусоиде в диаметральной плоскости за корпусом корабля. В позиции А – плавник подобен крылу, в позиции: В – ротору.59
- Рис. 27.** В ходе вычислительного эксперимента задействуются два графических окна для представления морского волнения и корпуса корабля с метacentрическими отметками и графиками его динамики на волнении. На 30" и 37" фиксируется обратное ускорение свободного падения -0,6g, за которым следует удар под широкий транцевый кормовой подзор, с регистрацией перегрузки 2,8g.61
- Рис. 28.** Слева круглая цилиндрическая бочка на волне, справа она же, но с бортовыми наклонными килями.66
- Рис. 29.** Аналогичный синхронный эксперимент при длине волны 50 метров с высотой 3 метра, при этом метacentрическая высота водоизмещающего корпуса уменьшена до 1% ширины, и составляет 10 см.66
- Рис. 30.** Вариант опытов с бортовыми килями значительно большей площади.67
- Рис. 31.** Синхронный вычислительный эксперимент с мореходными испытаниями «Аврора» с чистым корпусом справа, с днищевым и бортовыми килями, и с кормовым рулём управления – слева.68
- Рис. 32.** Испытание телеуправляемой 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 оптимизированы для штормового плавания, становится чрезвычайно опасным	75
Рис. 33. 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.	78

Использованные источники исследований

1. *Войткунский Я. И., Фадеев Ю. И., Федяевский К. К.* Гидромеханика. Л. Судостроение, 1968. – 568 с.
2. *Кильчевский Н. А.* Элементы тензорного исчисления и его приложения в механике (*Физико-математическая библиотека инженера*). – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954, – 168 с.
3. *Храмушин В. Н.* Поисковые исследования штормовой мореходности корабля. История эволюционного становления корабельного дела, о единении морских инженерных наук и хорошей морской практики. Lambert Academic Publishing. ISBN-13: 978-613-8-23643-6, 2018. 470 стр. shipdesign.ru/Khram/History-III.pdf
4. *Храмушин В. Н.* Трехмерная тензорная математика вычислительных экспериментов в гидромеханике. – Владивосток: ДВО РАН 2005. – 212с. shipdesign.ru/Khram/Tensor_Mathematics-2005.pdf
5. Справочник по теории корабля. Том 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители. / Под редакцией *Я. И. Войткунского*. – Л.: Судостроение, 1985. – 768 с., ил.
6. Справочник по теории корабля. Том 2. Статика судов. Качка судов. / Под редакцией *Я. И. Войткунского*. – Л.: Судостроение, 1985. – 440 с., ил.
7. *Mr. J. H. Michell* on the Wave-Resistance of a Ship. (*Джон Генри Мичелл*. Волновое сопротивление корабля) *Philosophical Magazine*, 1898, vol.45, Ser.5, pp.106–123. shipdesign.ru/JHM-rus.html
8. *Людвиг Прандтль*. Гидроаэромеханика. М.: Издательство иностранной литературы, 1949. – 520 с. (*Führer durch die Strömungslehre. Von Dr. Ludwig Prandtl. 1944, Предисловие автора: Геттинген–1942*)
9. *Томас С. Джилмер*. Проектирование современного корабля. – Л.: Судостроение, 1974. – 280 с., ил. (*Modern Ship Design, by Thomas Charles Gillmer, 1970*)
10. *Arnold Sommerfeld*. *Mechanik der deformierbaren medien*. Leipzig.: Zweite, neuberbeitete Auflage. 1949. (*Арнольд Зоммерфельд*. Механика деформируемых сред. М.: Издательство иностранной литературы, 1954. 491 с.)
11. *Franz Joseph Gerstner*: 1802 “Theorie der Wellen,” *Böhmische Gesellschaft der Wissenschaften, Abhandlungen*; 1804 “Theorie der wellen samt einer daraus abgeleiteten Theorie der Deichprofile”. *Теория волн вместе с основанной на ней теорией волновых профилей* (Prague: Gottlieb Haase); sowie 1809 in *Annalen der Physik*, 32, 412–445.

12. [«Контекстная графика»](#) – (Window-Place) Контекстно-зависимая среда построения трехмерной графики OpenGL с использованием виртуальных процедур C++ и многооконного интерфейса Windows со стекowym наложением графических и текстовых фрагментов. *Храмушин В. Н.* СахГУ № 2010615850 от 8 сентября 2010 г. Заявка № 2010614191, дата поступления 13 июля 2010 г.
shipdesign.ru/SoftWare/2010615850.html
13. [«Н u 11»](#) – Построение аналитической формы корпуса корабля, расчеты волнового сопротивления, кривых элементов теоретического чертежа и диаграмм остойчивости морских судов. *Храмушин В. Н.* СахГУ № 2010615849 от 8 сентября 2010 г. Заявка № 2010614190, дата поступления 13 июля 2010 г.
shipdesign.ru/SoftWare/2010615849.html
14. [«Тензор»](#) - Программа для построения числовых объектов и функций трехмерной тензорной математики при реализации вычислительных экспериментов в гидромеханике *Храмушин В. Н.* СПбГУ № 2013619727 от 14 октября 2013 г. Заявка № 2013617542 от 20 августа 2013 г.
shipdesign.ru/SoftWare/2013619727.html
15. [«Ядро»](#) - Интерактивный графический программный комплекс для моделирования взаимодействия поляризованных корпускул в трехмерном пространстве. *Богданов А. В., Храмушин В. Н.* СПбГУ № 2013619726 от 14 октября 2013 г. Заявка № 2013617576 от 20 августа 2013 г.
shipdesign.ru/SoftWare/2013619726.html
16. [«Волна»](#) - Интерактивный графический программный комплекс для построения и визуального анализа штормовой поверхности моря. *Дегтярев А. Б., Богданов А. В., Храмушин В. Н.* СПбГУ № 2013619728 от 14 октября 2013 г. Заявка № 2013617543 от 20 августа 2013 г.
shipdesign.ru/SoftWare/2013619728.html
17. [«SpecrM»](#) - Программа интерактивной графической визуализации спектральных зависимостей для парных и распределенных по морским акваториям временных рядов. *Дегтярев А. Б., Храмушин В. Н.* СПбГУ № 2015618259 от 4 августа 2015 г. Заявка № 2015614809 от 5 июня 2015 г.
shipdesign.ru/SoftWare/2015618259.html

18. [«Vessel»](#) - БД Цифровые теоретические чертежи для проектного анализа гидростатических характеристик, остойчивости и ходкости корабля.
Богданов А. В., Храмушин В. Н. СПбГУ № 2015621368 от 8 сентября 2015 г.,
Заявка № 2015620664 от 5 июня 2015 г.
shipdesign.ru/SoftWare/2015621368.html

Патенты и заявки на изобретения

19. [«Корабль без бортовой качки на волнении»](#). Храмушин В. Н. Патент № 2360827 от 10.07.2009 г. Бюл. № 19. Рег.№ 2007133623, от 07.09.2007 г., вх.№ 036720.
shipdesign.ru/Invent/01.html
20. [«Корабль без килевой качки на ходу на волнении»](#). Храмушин В. Н.
Рег.№ 2007133625 от 07.09.2007 г., вх.№ 036722. Бюл.№ 8 от 20.03.2009 г.
shipdesign.ru/Invent/02.html
21. [«Корабль с плавниковым движителем»](#). Храмушин В. Н. Патент № 2360831 от 10.07.2009 г. Бюл. № 19. Рег.№ 2007133624, от 07.09.2007 г., вх.№ 036721.
shipdesign.ru/Invent/03.html
22. [«Активный стабилизатор килевой и бортовой качки корабля – штормовой аварийный движитель»](#). Храмушин В. Н. Патент № 2384457 от 20.03.2010 г.
Бюл. № 8. Рег. № 2008116649, от 24.04.2008 г., вх.№ 018958. (решение о выдаче патента от 2009-10-01)
shipdesign.ru/Invent/04.html
23. [«Корабль гидрографической и патрульной службы»](#). Храмушин В. Н.
Патент № 2384456 от 20 марта 2010 г. Бюл. № 8. Рег.№ 2008117748, от 4.05.2008 г., вх.№ 020436. (решение о выдаче патента от 2009-07-21)
shipdesign.ru/Invent/05.html
24. [«Корабль, остойчивый в штормовом плавании»](#). Храмушин В. Н.
Патент № 2487043 (СахГУ). Бюл. № 2. от 20 января 2013 г. Рег.№ 2011129192, от 12.07.2011 г. (составлено 2011-01-17, решение о выдаче патента от 2012-11-01)
shipdesign.ru/Invent/06.html
25. [«Рыболовное судно северных морей»](#). Храмушин В. Н. Патент № 2535382 (СахГУ). Бюл. № 34. от 10 декабря 2014 г. Рег.№ 2012145301, от 24.10.2012 г. вх.№ 072860. (составлено 2012-05-27)
shipdesign.ru/Invent/07.html

26. «Носовая оконечность быстроходного надводного корабля или относительно тихоходного гражданского судна повышенной штормовой мореходности и ледовой проходимости в автономном плавании» - Форштевень и скула корабля (Stem). Храмушин В. Н. Патент № 2607136, Бюл.№ 1 от 2017-01-10. Рег.№ 2015107067/20(011473), от 2015-03-02. (составлено 2015-01-12, решение о выдаче патента 2016-07-27) shipdesign.ru/Invent/08.html
27. «Кормовая оконечность стабилизированного для штормового плавания корабля» - Ахтерштевень и кормовой подзор корабля (Stern). Храмушин В. Н. Патент № 2607135, Бюл.№ 1 от 2017-01-10. Рег.№ 2015107068/20(011474), от 2015-03-02. (составлено 2015-01-12, решение о выдаче патента 2016-07-27) shipdesign.ru/Invent/09.html
28. «Универсальное транспортное судно» (Univer86). Храмушин В. Н. Патент № 2603709 (СахГУ). Рег.№ 2015126838/11(041761), от 2015-07-03. (составлено 2015-03-26, решение о выдаче патента 2016-07-04) shipdesign.ru/Invent/10.html
29. «Морской спасатель - научно-исследовательское судно» (A1202). Храмушин В. Н. Патент № 2603818 (СахГУ). Рег.№ 2015126828/11(041748) от 2015-07-03. (составлено 2015-03-26, решение о выдаче патента 2016-07-04) shipdesign.ru/Invent/11.html
30. «Каботажное пассажирское судно» (A1205). Храмушин В. Н. Патент № 2653906, бюл. № 14 от 2018-05-15. Рег.№ 2016150049 от 2016-12-19, вх.№ 080348 (составлено 2016-12-02). Решение о выдаче патента от 2018-01-15 shipdesign.ru/Invent/12-Coaster.html
31. «Надводный борт и верхняя палуба корабля» (Deck). Храмушин В. Н. Заявка: № 2016150045 от 2016-12-19, вх.№ 080344, публ.бюл.№17 от 2018-06-20 (составлено 2016-12-01). shipdesign.ru/Invent/13-Ship_Deck.html
32. «Гидродинамическая модель источника штормовых нагонов и экстремальных течений под воздействием подвижного атмосферного тайфуна». Храмушин В. Н. Патент № 2652642, бюл. № 13 от 2018-04-28. Рег.№ 2016150042 от 2016-12-19, вх.№ 080340 (составлено 2016-11-18). Решение о выдаче патента от 2018-01-18. shipdesign.ru/Invent/14.html

33. «[Гидродинамическая модель очага цунами](#)». Храмушин В. Н. Патент № 2652643, бюл. № 13 от 2018-04-28. Рег.№ 2016150038 от 2016-12-19, вх.№ 080336 (составлено 2016-11-16). Решение о выдаче патента от 2018-01-17.
shipdesign.ru/Invent/15.html
34. «[Жесткое машущее крыло без индуктивного вихреобразования, с реактивным сглаживанием спутных вихревых потоков – маршевый движитель корабля](#)» (жесткое машущее крыло в профилированном коробе-насадке) [Судовой движитель]. Храмушин В. Н., Ганкевич И. Г. Патент № 2745044, бюл. № 8 от 2021-03-18
shipdesign.ru/Khram/Wings.html#_12
35. «[Гибкое крыло с локальным приводом у борта корабля, плавниковый движитель – активный скуловой стабилизатор](#)» (гибкий плавник) [Активный скуловой стабилизатор качки судна]. Храмушин В. Н., Богданов А. В., Дегтярев А. Б. Патент № 2749820, бюл. № 17 от 2021-06-17
shipdesign.ru/Khram/Wings.html#_20

Полезные модели

36. «[Сверхмалое автономное гидрофизическое судно с плавниковым движителем](#)». СКБ САМИ ДВО РАН, Патент ПМ № 65018, заявка № 2007101994 от 2007.01.18, зарегистрирован 2007.07.27.
shipdesign.ru/Ocean/SKB-01-23.html
37. «[Сверхмалое автономное гидрофизическое судно](#)». СКБ САМИ ДВО РАН, Патент ПМ № 51586, заявка № 2005125544 от 2005.08.10.
shipdesign.ru/Ocean/SKB-01-22.html

Архив исполняемых модулей программ с подборкой цифровых теоретических чертежей различных кораблей и судов доступны по адресу интернет: ShipDesign.ru/SoftWare/Ship.zip,
руководство к программам Aurora и Hull: ShipDesign.ru/SoftWare/Vessel-action.pdf,
математические модели и алгоритмы: [=//= Vessel-master.pdf](#),
мореходные эксперименты и проектирование корабля: [=//= Vessel-praxis.pdf](#) .
исходные тексты программ и помощь в их освоении: [GitHub.com/Khram-V/Vessel](https://github.com/Khram-V/Vessel) и Khram@mail.ru .

~2023-12-31 Петергоф ~ Lausanne ~ ירושלים