

Штормовая мореходность корабля (вычислительный эксперимент)

Vessel on Stormy Waves (computational experiment)

236039 Калининград, Калининградское мореходное училище, Судоводительское отделение, ул. Мореходная, 3
190121 Ленинград, Ленинградский кораблестроительный институт, Кораблестроительный факультет, кафедра гидромеханики, ул. Логманская, 3
690095 Владивосток, Дальневосточный государственный технический университет, кафедра теории и проектирования корабля, ул. Пушкинская, 10
191186 Санкт-Петербург, Российское научно-техническое общество судостроителей им.Алексея Николаевича Крылова, Невский проспект, 44
198504 Старый Петергоф, Санкт-Петербургский государственный университет, факультет Прикладной математики – процессов управления, Университетский проспект, 35
кафедра компьютерного моделирования и многопроцессорных систем,

Рабочие записи, часть 4

Экспериментальные исследования мореходности и вычислительные эксперименты с проработкой обводов корпуса корабля

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 поверки навигационных решений бортовыми счётно-решающими приборами, что важно в обеспечение действий корабля по прямому назначению; для 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 трохoidalным 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 корабля 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 поисковых работ обуславливается уникальными особенностями дальневосточных морей, где ожидание хорошей погоды приводит к неприемлемым простоям и экономическим потерям от вынужденного штормования на условно «безопасных курсах» на глубокой воде вдали от побережья. Сопутствующее удорожание проектирования, постройки и эксплуатации океанского флота и всей прибрежной инфраструктуры характеризует морское хозяйство Дальнего Востока России, где недостаточно «достижений» общемирового среднеширотного мореходства .

Оглавление

Экспериментальные исследования мореходности и вычислительные эксперименты с.....	проработкой обводов корпуса корабля	
Синтез проектных предпосылок из анализа гидростатики, остойчивости и ходкости корабля на тихой воде.		3
<i>Запас остойчивости при формировании обводов в средней части корпуса.....</i>		<i>6</i>
Геометрические особенности обводов корпуса и оценки запаса остойчивости корабля		14
Предварительные заключения по штормовой остойчивости и гидродинамике корабля		18
<i>Корабельное волнообразование – отражение штормовых волн от корпуса корабля.....</i>		<i>30</i>
Особенности корабельного волнообразования и влияние обводов на силовую реакцию под воздействием штормовых волн		32
«Аврора», «Ташкент», «Киров» – килевая качка и ходкость на волнении		40
Опытные испытания и сравнительная апробация современных, гипотетических и эволюционных обводов корпуса корабля.....		46
Всепогодный океанский флот Главного управления кораблестроения России 2001 года		52
Постановка и проведение прямых вычислительных экспериментов с кораблём в штормовом море		56
<i>Особенности реализации штормовых опытовых и вычислительных экспериментов.....</i>		<i>60</i>
<i>Бортовые кили и крылья активных успокоителей качки.....</i>		<i>61</i>
<i>Мореходные испытания кораблей перспективного и действующего флота</i>		<i>69</i>
<i>Список рисунков.....</i>		<i>72</i>

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 в относительно малых объемах жидкости с условиями сохранения и равномерного распределения энергии волновых пакетов по поверхности глубокой воды.

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 хода 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, врезавшись в волну, 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 [Поисковые...-2018]

к морской практике

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 корабля на различных штормовых курсах и скоростях хода. Также трудно признавать корректным анализ судовых журналов, с присущими субъективными факторами судоводительских заключений вкуче 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 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:

*к обоснованию
вычислительного*

- 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 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).

*гидростатические оценки
и ориентация на ходкость*

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 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 аperiodического подавления резонанса может излишне раскачивать корабль на крутых штормовых склонах.

о бедах дифференциальных уравнений качки корабля

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 при формировании 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 ожидать 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 морской практике, как пример, отмечались собственные периоды по бортовой качке рыболовного траулера типа «Атлантик» в Атлантическом океане порядка 16 секунд, а пассажирского судна «Любовь Орлова» в Японском море на ходу по волне – 30 секунд

(Рис. 1), что создавало комфортные условия обитания для пассажиров и экипажа.

С помощью капитанской формулы:

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

где τ [сек] – собственный период бортовой качки, h [м] – метацентрическая высота; B [м] – ширина корпуса, C_g – эмпирический параметр для широкого класса судов оценивается величиной $C_g \approx 0,8$. Рассматривая действующую метацентрическую высоту этих судов:

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

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



Рис. 1. Пассажирский лайнер «Любовь Орлова» без широкой транцевой кормы – обладает плавной качкой с прогнозируемой интенсивностью.

Капитан и грузовой помощник уверенно аргументируют достаточность устойчивости вверенных им судов, что отвечает уровню морской грамотности и хорошей морской практики по снижению интенсивности бортовой качки.

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

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

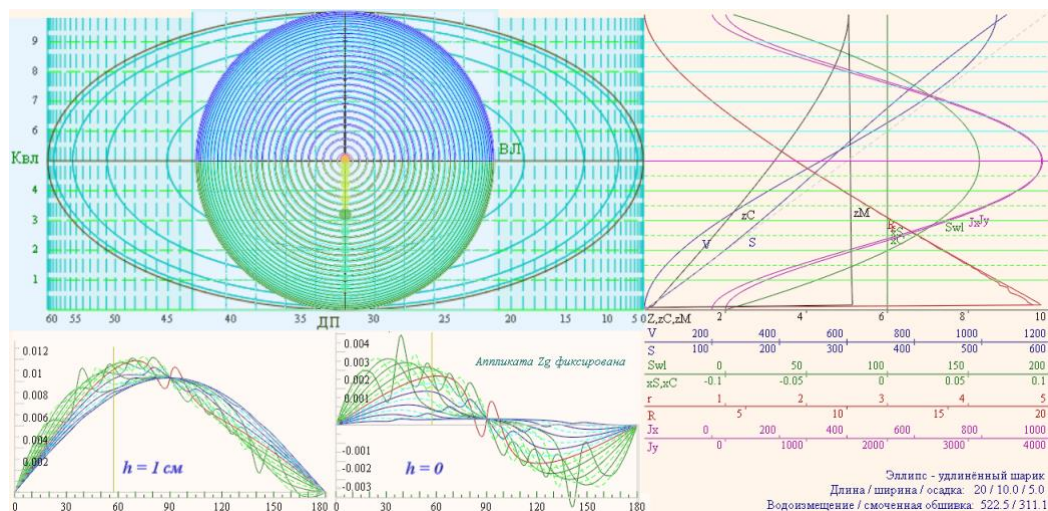


Рис. 2. Проекция бок и корпус теоретических контуров эллипсоида (сверху-слева); для диаграммы устойчивости (слева-внизу)¹ при фиксированном положении центра тяжести (Z_g) и правее – при нулевой начальной метацентрической высоте ($h = 0$), и левее – при ($h = 1 \text{ см}$) одной тысячной от ширины корпуса ($h = 0,1\%B$); справа кривые элементов теоретического чертежа: zC [м] – аппликата центра величины; $zM \equiv 5$ [м] – аппликата метацентра; V [м³] – грузовой размер; S [м²] – смоченная поверхность корпуса; Swl [м²] – площадь действующей ватерлинии; $xC = 0$, $xS = 0$ [м] – абсциссы центра величины и центра ватерлинии; r , R [м] – поперечный и продольный метацентрические радиусы; J_x , J_y [м⁴] – моменты инерции площади действующей ватерлинии относительно продольной и поперечной осей корпуса.

¹ Пульсации графиков на диаграммах устойчивости показывают величины погрешностей интегрирования таблиц плазовых ординат простыми (линейными) методами трапеций.

В качестве простейших и наиболее показательных плавающих тел можно рассмотреть 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. 2 – 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 проводится 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 в обычных условиях с плоским днищем 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 на корпусе не будет выступающих частей, а трение для касательных компонент обтекающих потоков считается пренебрежимо малыми.

Диаграммы остойчивости куба (Рис. 3) 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 наклонится на 45° , выйдя в положение с диагональной шириной и максимальной площадью ватерлинии.

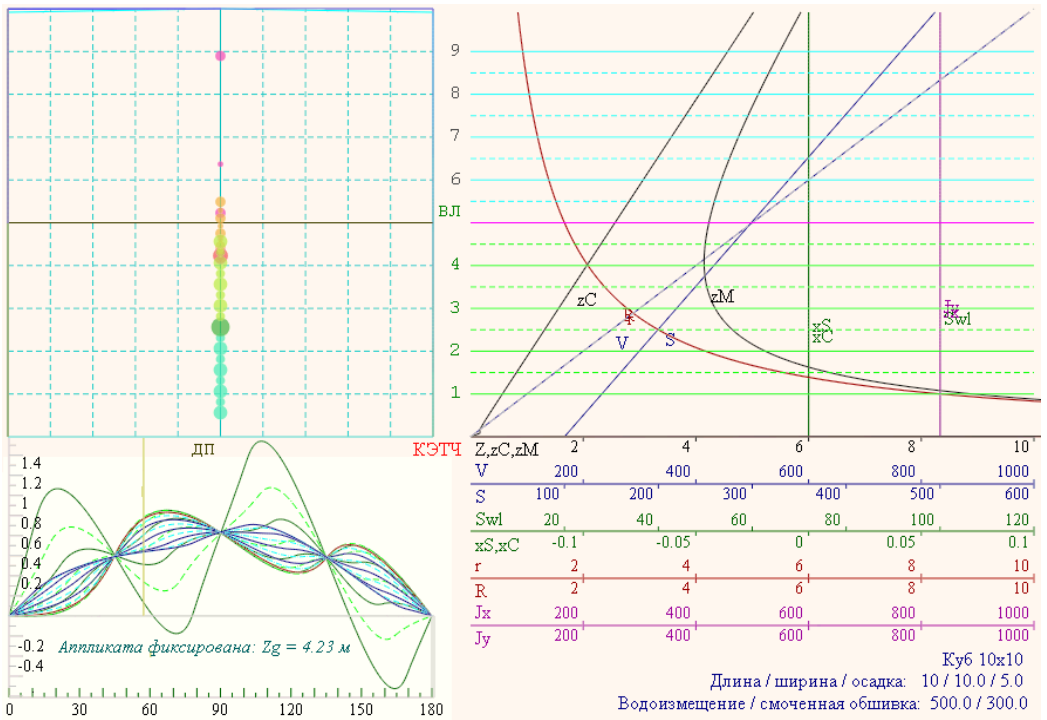


Рис. 3. Контуры корпуса куба (сверху-слева); и его диаграммы остойчивости (слева-внизу) при фиксированном положении центра тяжести (Z_g) и нулевой начальной метацентрической высоте ($h=0$); справа гидростатические кривые элементов теоретического чертежа.

Важное замечание относительно влияния любого изменения осадки на обретение положительной величины метацентрической высоты, что как бы взаимокompенсует снижение центра тяжести, **возвращая плавающему кубу интегральную остойчивость с весьма большой метацентрической высотой в тех 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 метацентрической высоте, если последнее, конечно, не будет испорчено обводами в оконечностях.

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 иначе, остойчивость заметно улучшается при подвсплытии корпуса, и немного ослабевает при погружении. То есть, существует оптимальная величина завала борта, при которой минимальная

величина начальной метацентрической высоты приходится на действующую ватерлинию и всегда возрастает при любом изменении осадки, что определяется возвышением метацентра над центром величины по метацентрическому радиусу, вычисляемому по отношению момента инерции площади действующей ватерлинии к водоизмещению: $r = Jx/W$ [м].

Рис. 2 с гидростатическими расчетами для чистого эллипсоида показывает независимость метацентрической остойчивости от текущей посадки корпуса. Спряменение с уменьшением кривизны контуров шпангоутов на уровне действующей ватерлинии служит улучшению характеристик штормовой остойчивости, в том числе при нулевой начальной метацентрической высоте. Усиление выпуклости с усиленной кривизной борта, соответственно, потребует повышенного контроля остойчивости корабля при заведомо большой метацентрической высоте, что на борту корабля наблюдается по резкости колебаний с малыми собственными периодами бортовой качки.

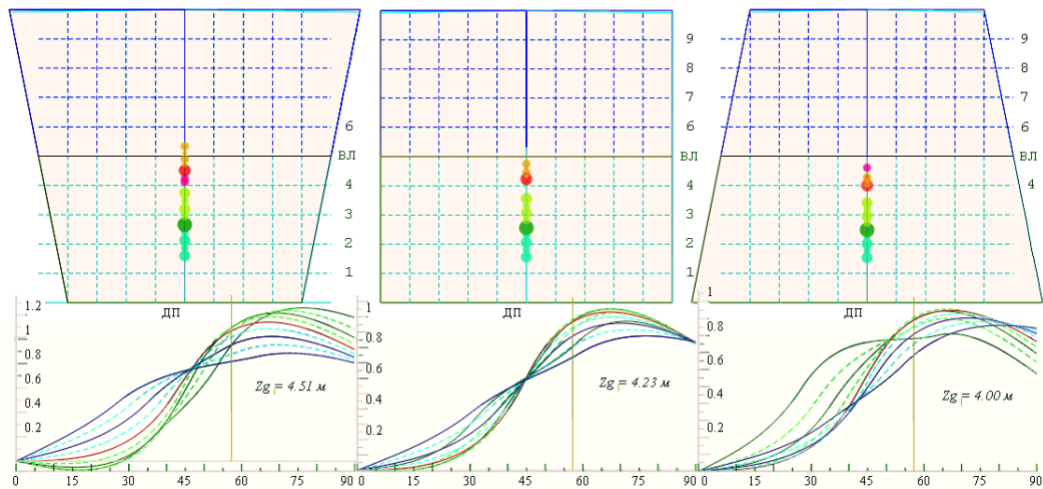


Рис. 4. Вариант расчетов остойчивости формы корпуса для развала борта – слева; вертикальных бортов – по центру; и завала бортов – справа. Диаграммы построены для фиксированного положения центра тяжести (Z_g) и нулевой начальной метацентрической высоты ($h=0$) при посадке по конструктивной ватерлинии №5. На диаграммах уменьшен до 40% диапазон расчётных осадок: №3÷4 – на всплытие, и №6÷7 ватерлиний – на погружение корпуса при вертикальной качке.

Плоский вертикальный борт также близок к оптимуму с возможным достижением абсолютной остойчивости в условиях вертикальной качки. Но всё же, с учётом естественного развала шпангоутных контуров на уровне

действующей ватерлинии в оконечностях корпуса, для компенсации негативных эффектов целесообразно усиливать завал борта в средней части корпуса.

Важно обратить внимание, что при завале борта для достижения нулевой начальной остойчивости аппликата центра тяжести должна быть несколько ниже $Z_g = 4$ [М], чем в случае вертикального борта $Z_g = 4,23$ [М] или борта с развалом $Z_g = 4,51$ [М], что формально ужесточает конструктивные и эксплуатационные требования к кораблю, однако, с привнесением лучшей обитаемости и безопасности в штормовом плавании.

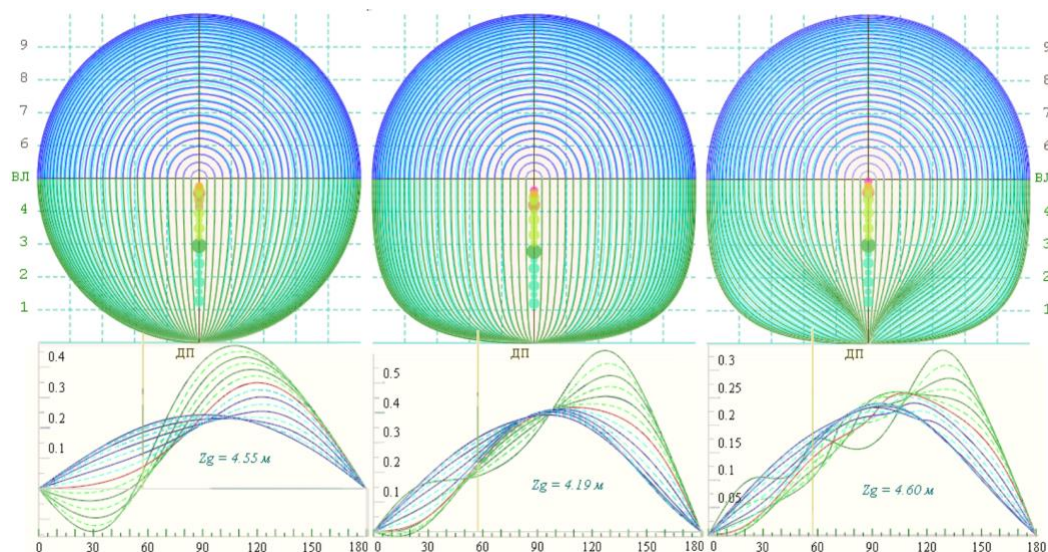


Рис. 5. Вариант расчетов остойчивости формы корпуса для цилиндрического корпуса – слева; корпуса кубической полноты со «струйной системой»² обтекания – в центре; клиперским скуловым гашением корабельных и внешних штормовых волн – справа. Диаграммы построены для фиксированного положения центра тяжести (Z_g); нулевой метацентрической высоты ($h = 0$); по осадкам: 2÷4 – на всплытие, и 6÷9 на погружение корпуса в условиях вертикальной качки.

Возвращаясь к рассмотрению обводов корпуса, оставляем надводную часть эллиптической формы (Рис. 5), которая не будет привносить излишних или дополнительных искривлений в расчетных графиках диаграмм остойчивости.

Чтобы получить приемлемые в практике обводы корпуса, можно вытянуть шпангоуты эллиптической формы до основной линии (Рис. 5, слева). Получаем,

² Илья Павлович Алымов. **Морской сборник**, 1879, №9, с.1÷54, №10, с.1÷52: «Очерки системы струйного образования судов и исследование опыта применения системы»; №12, с.103÷156: «Опыт фактического применения системы струйных образований судов».

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%, 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 метацентра 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 модели «системы струйного обтекания» [МС, 1879], 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. 5, справа). В клиперских обводах также немного увеличиваются плечи восстанавливающих моментов при подвсплытии корпуса, и для исключения остаточного неположительного фрагмента диаграммы остойчивости 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 с округлым корпусом ввиду малоподвижности аппликаты метацентра в условиях интенсивной вертикальной бортовой качки.

Геометрические особенности обводов корпуса и оценки запаса остойчивости корабля

Показательно сопоставление исторических проектных решений в построении корабельных обводов, с настоящими видениями эстетического формирования общекорабельной архитектуры, на фоне перспективных установок целевого проектирования с использованием эволюционного согласования и совершенствования гидромеханики штормовой ходкости корабля.

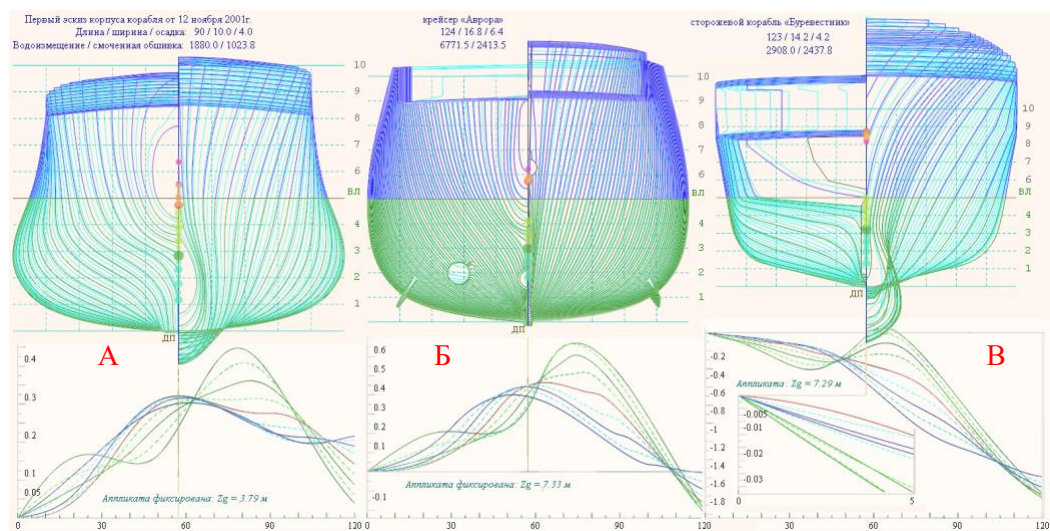


Рис. 6. Сверху изображены три варианта проекции корпус для теоретических чертежей с диаграммами остойчивости формы корпуса кораблей, ниже, для различных осадок при фиксированных положениях центра тяжести (Z_g) и нулевой начальной метацентрической высоте ($h=0$): **А**-«Корвет» – корабль повышенной штормовой 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 №5, зеленые по ватерлиниям №3÷4 – при всплытии, и синие №6÷7 – при погружении в динамическом процессе в условиях вертикальной качки.

Особенности формы и распределения площадей под кривыми на диаграммах остойчивости для различных осадок (**Рис. 6**) характеризуют запас остойчивости в качестве весьма важных характеристики корабельных обводов и формы корпуса в целом. На чертежах корпуса и диаграммах Риды 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 источникам³ составляла $h=80$ см, и периодом 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 остойчивости, в то же время как S-образная вогнутость диаграмм для «Авроры» - повышает остойчивость 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» огромным «рычагом» метацентрической высоты, с ухудшением общих показателей остойчивости и мореходности, если результат получается вовсе не лучше чем у

³ Костенко В.П. На «Орле» в Цусиме. Л.: Судостроение, 1968. 525 с.

«Авроры» без одного «рычага»? Точка перегиба с небольшим завалом борта на уровне действующей ватерлинии придаёт абсолютную остойчивость даже при нулевой начальной метацентрической высоте – условие плавной аперiodической качки. Отличительной особенностью остойчивости перспективного корабля А-«Корвет» отмечается быстрое восстановление положительной величины метацентрической высоты и действующих плеч остойчивости при любых изменениях посадки, также как и при относительно больших углах накренения.

Неожиданно почти такой же эффект, но чуть менее выраженный, наблюдается у крейсера Б-«Аврора», что можно признать неким чудесным провидением или особой морской грамотностью старшего кораблестроителя крейсера Северия Ксаверьевича Ратника, 1895 год. Запас остойчивости по оценкам максимальных плеч остойчивости 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 положительной остойчивости при любых изменениях осадки, с повсеместно быстрым ростом плеч остойчивости по ярко-выраженным S-образным вогнутостям диаграмм остойчивости, 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 остойчивости для тихой воды нет вовсе, и при снижении до нуля начальной остойчивости корабль рискует немедленно опрокинуться кверху килем без каких-либо видимых предостережений, которые можно было бы отметить в наставлениям мореплавателям.

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 остойчивости формы корпуса при S-образных диаграммах будет обнаруживаться постоянным или длительным накрением 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. 6-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»⁴ 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 проявлениями сильных ударов волн в кормовой оконечности, особенно на курсе по волне.

В предварительных заключениях попробуем вкратце проанализировать намечившиеся концептуальные предпосылки к предопределению мореходных

⁴ 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.

качествах 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 офицеров-наставников Судоводительского отделения Калининградского мореходного училища в 1975 году проведены первые опытовые эксперименты с оптимизированными обводами корабля повышенной штормовой мореходности, и, впоследствии, в 1985 году, в ходе технико-исторических апробаций мореходных качеств исторических корабельных обводов (Рис. 7), на базе мореходного опытового бассейна кафедры теории корабля Ленинградского кораблестроительного института отчасти были отработаны ключевые концепции оптимального проектирования корпуса и общекорабельной архитектуры в согласии с настоящими целевыми показателями непротиворечивого проектирования корабля повышенной штормовой мореходности.

Корабельные изыскания без задействования современной вычислительной техники исторически строились на основе опытовых экспериментов с моделями кораблей морской практике судоводителей, с последующими чисто практическими обоснованиями гидромеханики качки и ходкости на основе гидростатических формализаций давления воды на смоченной обшивке корабля, с вовлечением анализа по корпускулярным моделям Ньютона с учетом кинематики потоков и давлений по Бернулли для потоков жидкости у борта и под винторулевым комплексом. Знание процессов 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 на ходу в открытом море или у причала, с учетом ветров и течений.

И потому изначальная концепция целевого проектирования корабля строилась на принципах непротивления внешнему штормовому воздействию. Для этого обводы корпуса должны настраиваться на пропуск бегущих штормовых волн без излишних искажений, и с минимально возможными силовыми импульсными воздействиями. Если такая геометрия и гидромеханика гладких потоков не формируется, то корпус оптимизируется привнесением

сбалансированных конструктивных элементов для частичной взаимокомпенсации интенсивных внешних воздействий, с настройкой на особенности крутых девярых валов или крупной зыби, без усиления или турбулизации локальных .

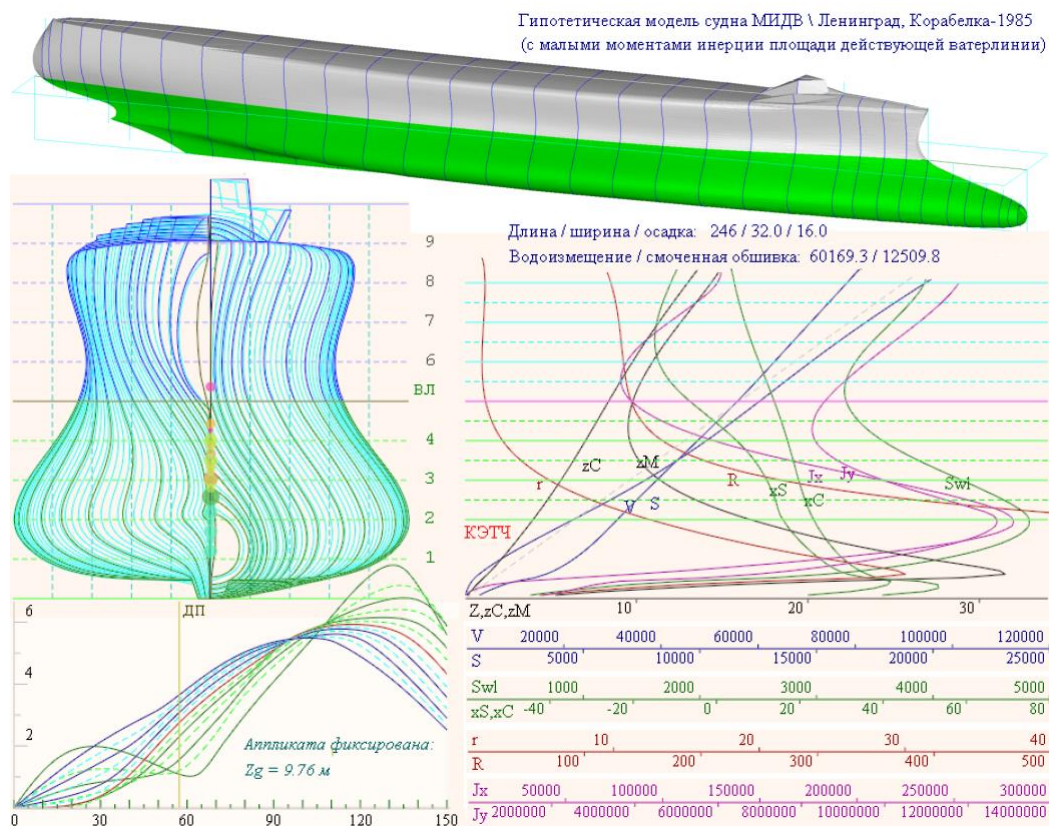


Рис. 7. Гиперболизованная относительно исторических обводов модель корабля с малыми моментами инерции площади действующей ватерлинии (МИДВ-1985), построенная и оснащенная телеметрическим оборудованием в 1985 году для сравнительных мореходных испытаний в опытовом бассейне кафедры теории корабля Ленинградского кораблестроительного института.

Такой своеобразный комплексный подход определял оригинальность и новизну запатентованных в России инженерных решений по достижению наилучших штормовых мореходных качеств корабля, как для обобщенных проектов корабельных обводов, так и для конкретных кораблей и судов океанского плавания, включая необходимую проработку усовершенствований двигателей и успокоителей качки для компенсации оптимизационных потерь.

По мере рассмотрения результатов вычислительных экспериментов вполне уместно возвращаться к ранее запатентованным 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 детальных обоснований и уточнения геометрии корабельных обводов в сочетании с общеархитектурными особенностями корабля.

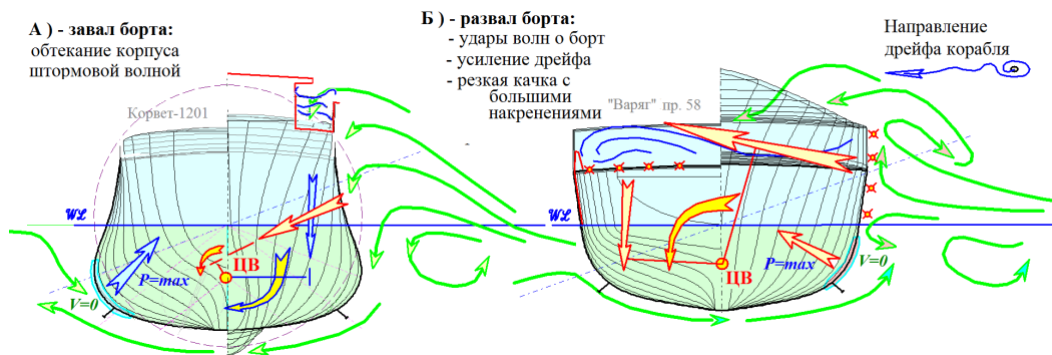


Рис. 8. Характер гидродинамического воздействия морского волнения на корпус корабля показывает различия в перераспределении кренящих гидродинамических пар сил и моментов: А) – перспективного, слева, и Б) – современного, справа кораблей. Кренящий момент от прямого воздействия волнового гребня на надводный борт А) компенсируется завалом борта, а длинная вдолькорпусная надстройка на верхней палубе и бортовые кили способствуют компенсации остаточного кренящего момента. В случае развала бортов Б) 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 пары силы действуют в сторону образования крена на подветренный борт.

Патент 2007 года № 2360827 «Корабль без бортовой качки на волнении»⁵ определяет особенности формы корпуса корабля, способствующие взаимокompенсации всех внешних сил волновой природы при их одновременном и всестороннем воздействии на корпус и палубы корабля. Целевое непротиворечивое проектирование корабля (Рис. 8, А) – всестороннее согласование гидростатики и гидромеханики штормового хода корабля с минимальным или скомпенсированным внешним силовым воздействием. В случае (Рис. 8, Б) – все внешние силы действуют на усиление опасности, а необходимость

⁵ «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

«безмерного» увеличения начальной остойчивости грозит мгновенным опрокидыванием под резонансным влиянием штормовых волн.

Небольшое уточнение проектных решений по обводам корпуса выполнено в 2011 году. Результаты серии мореходных испытаний телеуправляемых моделей судов с проектными предпосылками о достижении наилучшей штормовой мореходности обоснованы и представлены к практической реализации в документации по патенту России⁶: «Корабль, остойчивый в штормовом плавании».

Современный корабль (Рис. 8, Б) 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, без компенсаций восстанавливающими моментами от пар сил по надводному борту с упором на центр подводного бокового сопротивления, усиливаемыми образованием сильного бокового дрейфа, превращающего бортовые и днищевые кили в паразитные выступающие части.

Корпус корабля с завалом борта (Рис. 8, А) подтормаживает штормовую волну на уровне подошвы, создавая гидродинамические условия для затягивания трохoidalного 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 по наветренному борту, чаще проявляется обрушение гребней на небольшом удалении после прохождения за борт подветренный, что подтверждает незначительное искажение формы и интенсивности проходящей через корпус волны, а также наличие малозаметной дифракции волновых гребней после обхода оконечностей 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

⁶ «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

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. 8, слева) может остановиться, к примеру, у подветренного борта, оставляя за этим бортовым килём только вязкое 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 перекатываются на подветренный борт в усиление крена.

Завал и вогнутость борта в средней части корпуса образуют ярко выраженную S-образность диаграмм остойчивости, что создаёт возможность и востребует для контроля остойчивости корабля по факту обнаружения затянувшихся по времени накрениений. 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 такого корпуса будут резонировать со свойственными для морских и прибрежных акваторий периодами штормовых волн порядка $6 \div 10$ секунд. Учитывая, что наличие развесистого развала шпангоутов проявляется снижением углов заката диаграммы остойчивости (естественное положение корпуса – кверху килем), возникает опасность опрокидывания корабля за счет резкого и усиленного размаха по максимальным углам крена на бортовой качке. Либо 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 $\tau_{\zeta} \approx 2,5\sqrt{T}$ [сек], где T [м] – осадка, и эти периоды соразмерны килевой качке $\tau_{\psi} \approx 2,4\sqrt{T}$ [сек], что обычно значительно меньше периодов штормовых волн, и так же как в случае с килевой качкой вертикальные всплытия/погружения корпус корабля подвержены резонансным проявлениям на встречных ходах относительно гребней штормового волнения.

В условиях интенсивной вертикальной качки требуется поддержание устойчивости при изменениях посадки корпуса, вплоть до возможности отрыва от поверхности воды и до полного погружения под воду со всеми верхними палубами. Ключевые предпосылки для решения этой проблемы представлены Патентом № 2487043 «Корабль, устойчивый в штормовом плавании»⁷, 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 поверялись с различными малыми моделями судов в периоды работы на море в Калининграде, в Севастополе и во Владивостоке, где в основном отработывались технические решения по ходкости, килевой и бортовой качке. Заключительным подтверждением возможности практически полного исключения бортовой качки⁸ в опытовом бассейне Комсомольского-на-Амуре государственного технического

⁷ «Корабль, устойчивый в штормовом плавании». Патент № 2487043 (СахГУ). Бюл. № 2 от 2013.01.20. Рег. № 2011129192, от 2011.07.12. ShipDesign.ru/Invent/06.html

⁸ 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.

университета. Соответственно, в вышеозначенных патентах представлена и обоснована расширенная гидродинамическая трактовка остойчивости корабля на интенсивном морском волнении (Рис. 8), 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, 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.

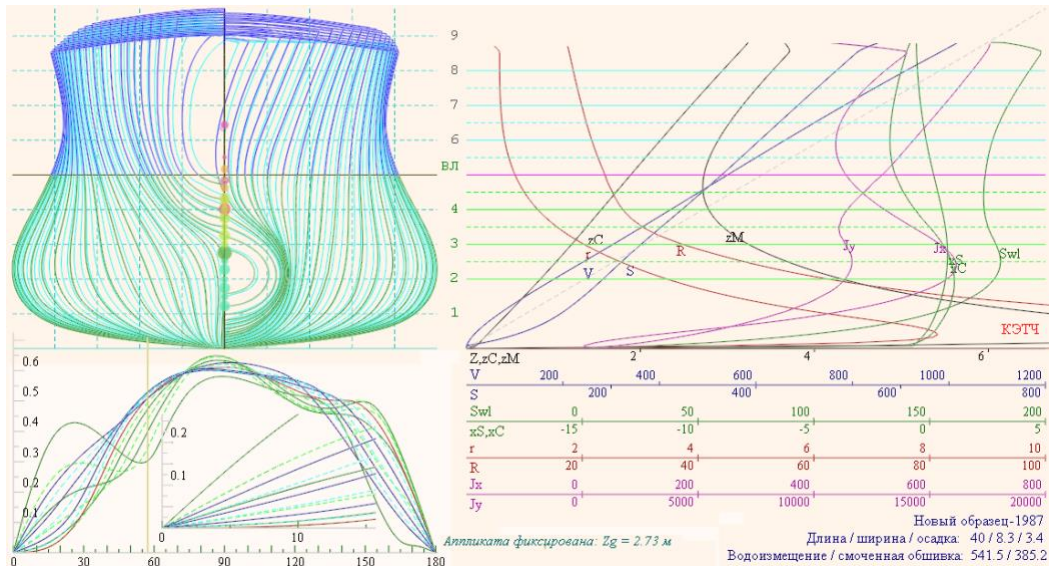


Рис. 9. 1) – гидростатические характеристики модели корабля «Early-1987», построенного по результатам обобщения серии мореходных экспериментов в опытовом бассейне кафедры теории корабля Ленинградского кораблестроительного института в 1985 году.

Корпус корабля (Рис. 9) с шифром «Early-1987» строился в качестве обновлённой компромиссной модели по результатам сравнительных опытовых экспериментов с моделью гиперболизированного корабля «МИДВ-1985».

Доработка проекта «Early-1987» проводилась с учётом необходимости снижения 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 излишней высоты. С этой целью в оконечностях устраиваются поверхности плавного закручивания набегающего потока от форштевня под днище, что соответствует формированию бульбового форштевня с условно клиперскими или V-образными обводами 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 наклона 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. 9) 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 замеряется величиной порядка 70 см, этого более чем достаточно для невеликого судна с длиной корпуса всего 40 м.

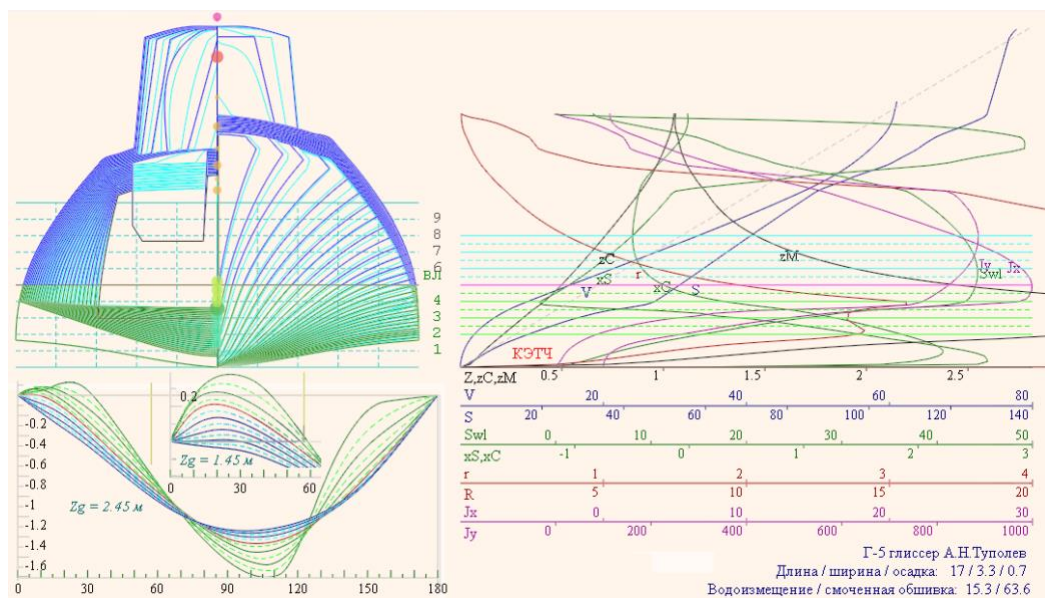


Рис. 10. 2) – остойчивость формы и кривые элементов теоретического чертежа (КЭТЧ) торпедного катера типа «Г-5» проекта ЦАГИ 1928 года.

Быстроходный глиссирующий 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. 10) должна оцениваться из гидродинамических принципов. Катер Г-5 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.

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 $l_{max} = 20$ см, и такое снижение в сравнении с $h=1$ м получается ввиду сильной выпуклости рабочей диаграммы остойчивости. Столь же ненадежная остойчивость свойственна лишь широким речным судам с малой осадкой и низким надводным бортом, для которых опасность опрокидывания наступает при оголении днища и погружения под воду палубы при условно небольших углах крена.

Для катера «Г-5» такое свойство малой остойчивости также объясняется относительно малой осадкой, при этом, как уже показывалось ранее (Рис. 5), покатый и округлый надводный борт катера практически не влияет на графики диаграмм остойчивости. Для глиссера, конечно, практическая остойчивость более связана с гидродинамикой скольжения по поверхности воды, где положительные восстанавливающие моменты даже слабой волне будут проявляться скорее ударными нагрузками.

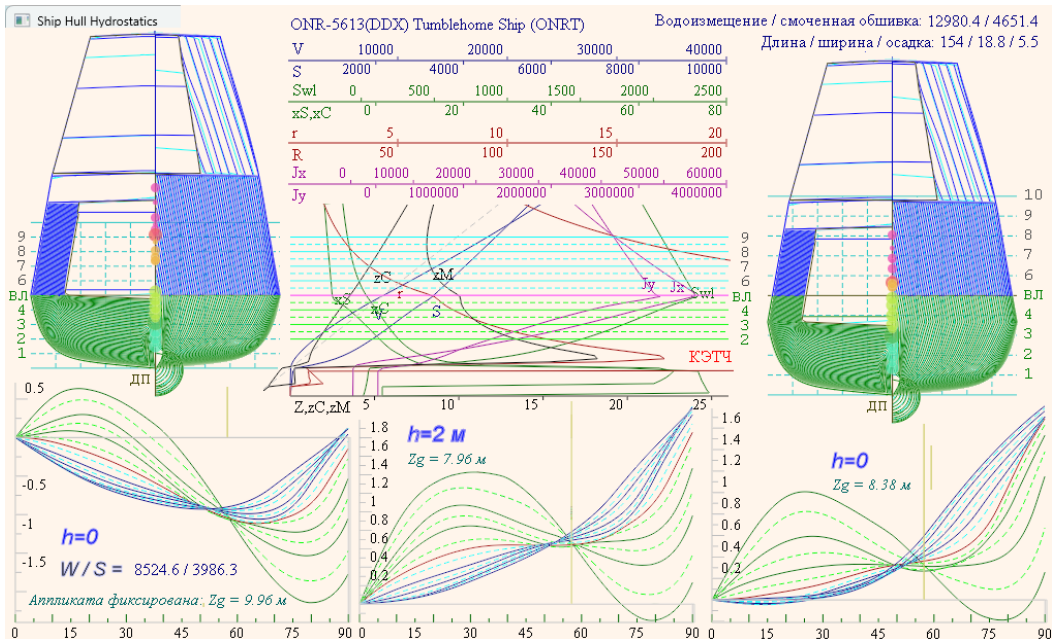


Рис. 11. 3) – гидростатические характеристики и диаграммы остойчивости предварительного проекта современного корабля «ONR-5613 Tumblehome ship». Левый чертеж корпуса по конструктивной осадке, ниже под ним диаграммы остойчивости формы корпуса $h = 0$, правее по центру те же диаграммы с фиксированием центра тяжести корабля на два метра ниже: $h = 2 \text{ м}$. Справа тот же корабль с осадкой на два метра большей, с диаграммами остойчивости формы корпуса $h = 0$.

Совсем неожиданно негативные оценки запаса остойчивости получаются в отношении экспериментальной модели «ONR-6513 Tumblehome ship» (Рис. 11), широко вовлеченной в отработку вопросов мореходности корабля на международных научных форумах⁹ кораблестроителей. В противоположность сделанным выше заключениям (Рис. 6) о предпочтительной вогнутости, или хотя бы спрямлении контуров шпангоутов на уровне действующей ватерлинии, в по всей длине корпуса 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.

На гидростатических кривых образуются острые сломы на J_x – поперечном и J_y – продольном моментах инерции площадей ватерлиний,

⁹ 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/

собственно и площадь самой ватерлинии сламывается под острым углом, что, видимо, усиливается широкой консолью транцевой кормы непосредственно на 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 угла 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.

Проведенный поиск оптимальной формы корпуса предопределяется в качестве особого или исходного этапа непротиворечивого проектирования обводов и общекорабельной архитектуры, с ориентацией на хорошую морскую практику и целевое предназначение корабля. В давние исторические времена успехи мореплавания связывались афоризмом о «красивом корабле, на борту которого не должно быть ничего лишнего».

Современное искусство проектирования корабля безмерно разнообразно вариантами обводов, с множеством противоречивых общearchитектурных представлений по обличию кораблей и гражданских судов, что формально предполагает существование некоего диалектического процесса по вопросам хорошей морской практики, с дискуссиями об эстетических воззрениях по

«красивому» кораблю – единственно адекватной предпосылки к видимому разнообразию. Эстетические концепции в теории и проектировании корабля могут быть вполне уместными для флота ограниченного района плавания по заведомо тихой воде, например для озерно-речного флота тихой воды с ограничениями по осадке; или для быстроходных кораблей охраны водного района, способных заблаговременно возвращаться в прибрежные убежища при неожиданных штормовых проявлениях или прогнозах плохой погоды от морских оперативных служб.

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 Jx [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 оцениваются как $\tau_{\psi} \approx 2,4 \cdot \sqrt{T}$ [сек] и вертикальной как $\tau_{\zeta} \approx 2,5 \cdot \sqrt{T}$ [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 взаимокompенсацией 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 взаимокompенсации гидродинамических сил вдоль корпуса корабля, **исключая сопротивление** формы корпуса корабля, связанного с асимметричным действием этих сил и дифферентующих моментов.

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

Особенности корабельного волнообразования и влияние обводов на силовую реакцию под воздействием штормовых волн

Корабельное волнообразование, также как и воздействие штормовых волн, происходит по бортовой обшивке на уровнях переменных ватерлиний, омываемых под воздействием вертикальной и килевой качки корабля.

В математической классике по Мичеллу-Кочину рассматриваются только волновые импульсы отражения встречного потока по условиям непротекания корпуса корабля, без добавления в математическую модель пульсаций давления за счет касательных компонент скоростей течений воды вблизи корабельной обшивки. В расчеты также не включается проседание ватерлинии в средней части корпуса, не учитывается изменение посадки и ходового дифферента на больших скоростях хода корабля.

Математическая модель корабельного волнообразования и взаимодействия корабля с морским волнением строится для сопоставимых по характеристикам излучаемых и поглощаемых корпусом корабля прогрессивных трохoidalных волн 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.

Чисто оценочный механизм образования корабельных волн позволяет прорабатывать концептуальные решения о возможности беспрепятственного прохождения штормовых волн через корпус корабля, с минимальными искажениями волновых фронтов – с минимальным силовым воздействием на корабль.

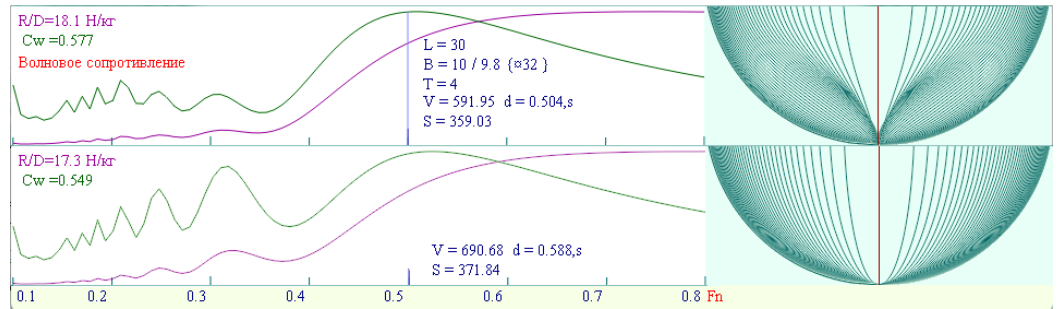
Исходный поиск оптимальной формы корпуса корабля может выполняться на основе серии поверочных расчетов с использованием интеграла Джона Генри Мичелла, [1898, *J. H. Michell*], физическая и геометрическая интерпретация которого выявляет взаимосвязь между корабельным волнообразованием на больших скоростях хода и силовым воздействием на корпус корабля со стороны морского волнения. Для начальной оптимизация корабельных обводов вполне достаточно оценочного анализа распределения гидростатических давлений и вихреисточников, моделирующих плавучесть и гидродинамические условия непротекания, интенсивность распределения которых по смоченной обшивке определяется исключительно геометрическими особенностями формы корпуса.

Тогда синтез элементов корабельных обводов будет оптимизироваться по результатам серии 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 Фруду порядка $Fn \approx 0,3$ и $0,5$, и что особо важно, с контролем минимального ущерба для теоретических минимумов волнообразования вблизи скоростей хода $Fn \approx 0,2$ и $0,4$.

Ранее, при формулировании принципов непротиворечивого построения обводов корпуса, поминалась необходимость небольшого завала борта на уровне действующей ватерлинии. В расчётах волнового сопротивления на тихой воде такой тезис подтверждается лишь с оговорками относительно корпуса с вертикальными бортами на миделе. В случае пропорционального развала бортов интенсивность корабельного волнообразования и удельное волновое сопротивление также снижается. Последнее возможно вследствие меньшего коэффициента продольной полноты корпуса, или по причине потери точности вычисления интегралов Мичелла на нулевом уровне – в полосе действующей ватерлинии. Вопрос академический и не влияет на оценочные выводы по форме корпуса корабля. В реальной гидромеханике имеют значение ходовой дифферент с искривлением ватерлинии под действием быстрых потоков вблизи судовой обшивки.

Весьма неожиданно, но именно расчеты корабельного волнообразования и волнового сопротивления с использованием интегралов Мичелла особо чувствительны к оценкам различия гидромеханики клиперских обводов с «системой струйного обтекания». Для малого миноносца типа «Касатка» со «струйной системой обтекания» подтверждается 2÷3% снижения удельного волнового сопротивления на предельно больших скоростях хода $Fn > 0,5$, где существенна лишь форма мидельшпангоута, а выигрыш сопоставим с величиной коэффициента продольной полноты корпуса, и не зависит от явных нарушений в гидромеханике плавных и безотрывных потоков в зонах скуловых обводов в оконечностях.

Шлюпка - эллипсоид с равноудалёнными ватерлиниями



Округлый корпус. Сверху клиперские V-образные обводы с укороченной волнообразующей длиной корпуса, ниже – струйные системы «полных» оконечностей. Зелёные кривые коэффициентов C_w , и красные – удельного сопротивления по водоизмещению R/D [Н/кг]. Справа теоретические (расчётные) шпангоуты в проекции корпуса.

Корпус - эллипсоид с обводами кубической полноты

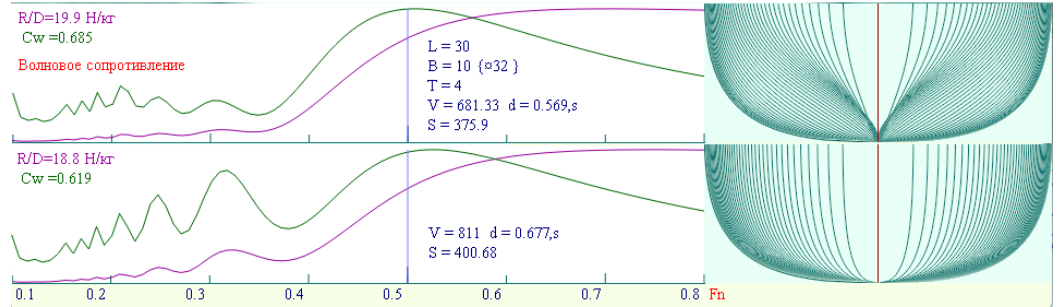


Рис. 12. Полнота корпуса 3-й степени. Предпоследний экстремум по $Fn \approx 0,32$, так же как и для меньших скоростей хода, проявляются усилением интенсивности килевой и бортовой качки под воздействием соизмеримых по длине штормовых волн.

Таблица 1.

Расчетные величины волнового сопротивления – интенсивности корабельного волнообразования на контрольных скоростях хода

Скорость хода, Fn	Удельное сопротивление [Н/кг]				Коэффициент сопротивления			
	R/D-клипер		R/D-струйный		Cw-клипер		Cw-струйный	
0,5	13,756	15,323	12,1	13,16	0,577	0,685	0,549	0,619
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
<i>Ф-миделя</i> δ	<i>округл.</i> 0,504	<i>3ⁱⁱ-ст.</i> 0,569	<i>округл.</i> 0,588	<i>3ⁱⁱ-ст.</i> 0,677	<i>округл.</i> 0,504	<i>3ⁱⁱ-ст.</i> 0,569	<i>округл.</i> 0,588	<i>3ⁱⁱ-ст.</i> 0,677
R-масштаб	18,1	19,9	17,3	18,8	-	-	-	-

Для меньших скоростей хода (Рис. 12) при $F_n < 0,4$, что также соответствует излучению расходящихся корабельных волн с меньшими фазовыми скоростями свободного распространения волновых фронтов, когда длина волны соизмерима или меньше волнообразующей длины корабля V-образные клиперские шпангоуты в оконечностях кратно снижают интенсивность волнообразования, что происходит при активной интерференции носовой и кормовой систем расходящихся корабельных волн.

В практике проектирования кораблей Военно-морского флота России по-видимому недооцениваются полезные свойства «английских клиперских» V-образных скуловых обводов в угоду «струйной системы» добавочной полноты, что сказывается значительным усилением интенсивности воздействия штормовых волн на скуловых поверхностях в оконечностях корабля. Этот эффект хорошо виден в расчётах с простыми эллипсоидальными обводами корпуса (Рис. 12, Таблица I), где в расчетах двукратный рост волнообразования на фазовых скоростях излучения расходящихся корабельных волн, и в опытовых испытаниях на воде (Рис. 13) проявляется крутым и высоким гребнем расходящейся корабельной волны, и, как следствие, усиленной бортовой и килевой качкой на ходу на трохоидальном волнении.

Не ограничиваясь элементарно простыми аналитическими обводами, далее рассматриваются два специально отработанных проекта кораблей с уменьшенными поперечными и продольными моментами инерции площади действующих ватерлиний, и для обобщенного заключения – кораблей исторического и действующего флота России.

Самая первая малоразмерная опытовая модель корпуса проектировалась по штормовым наблюдениям на борту супертраулера «Багратионовск». Обводы такой модели концептуально согласовывались с наблюдениями за плаванием рыб на малой глубине под взволнованной ветром поверхностью Атлантического океана. В последствии проводились показательные и весьма успешные испытаниями в малом опытовом бассейне для изучения теории корабля в Калининградском мореходном училище.

Последующая доработка обводов (Рис. 13) выполнялась в Севастопольском экспериментальном конструкторском бюро на борту научного судна СРТМК¹⁰ «Зайнулла Мустакимов» в Чёрном море.

¹⁰ СРТМК – средний рыболовный траулер кормового траления.

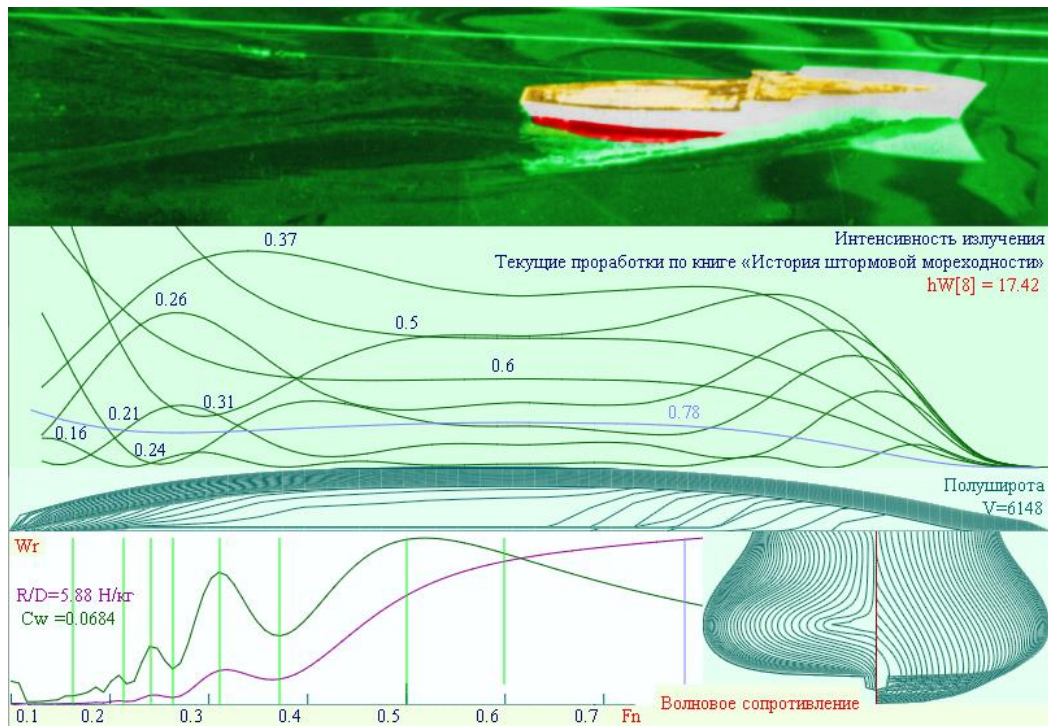


Рис. 13. Вычисление волнового сопротивления; интенсивности излучения и интерференции корабельных волн у корпуса опытовой модели из 1979-1980 гг. На верхнем фото показано зарождение и отрыв крупной расходящейся волны вблизи поверхности эквидистантных ватерлиний в носовой оконечности. Вследствие оголения горизонтального плавника на ахтерштевне, на большой скорости хода у модели проявляются проблемы с поперечной остойчивостью.

Непосредственно перед постановкой полноценных сравнительных мореходных экспериментов со специально оснащенными измерыми крупными моделями судов, в обоснование проектирования и постройки гипотетической модели повышенной штормовой мореходности, проведены дополнительные пробно-оценочные эксперименты с двумя малыми моделями традиционных и условно рыбоподобных обводов (Рис. 13), но уже в гравитационной системе опытового бассейна кафедры теории корабля Ленинградского кораблестроительного института.

В те годы ещё не акцентировалось внимание на особенностях английской клиперской скулы с V-образными (треугольными) шпангоутами в оконечностях; вычислительные эксперименты еще не были доступны для выявления невероятного улучшения мореходных качеств клиперских оконечностей корпуса, и потому в обводах не отрицался малый прирост полноты корпуса в «системе

струйных образований» с эквидистантными ватерлиниями и резким загибом батоксов для вертикальных компонент набегающих на корпус потоков воды. К тому же, в планах мореходных испытаний на волнении предусматривалось рассмотрение особенностей формы и мореходных качеств корпуса при существенных изменениях посадки, как отличие штормовой гидромеханики для кораблей с различными отношения ширины к осадке корпуса.

В приводимых далее расчётах абсолютные значения величин волнового сопротивления в большой степени зависят от удлинения моделей – отношения длины к ширине корпуса, и потому целесообразно отмечать только форму кривых с соотношениями между собой интерференционных максимумов для различных скоростей хода.

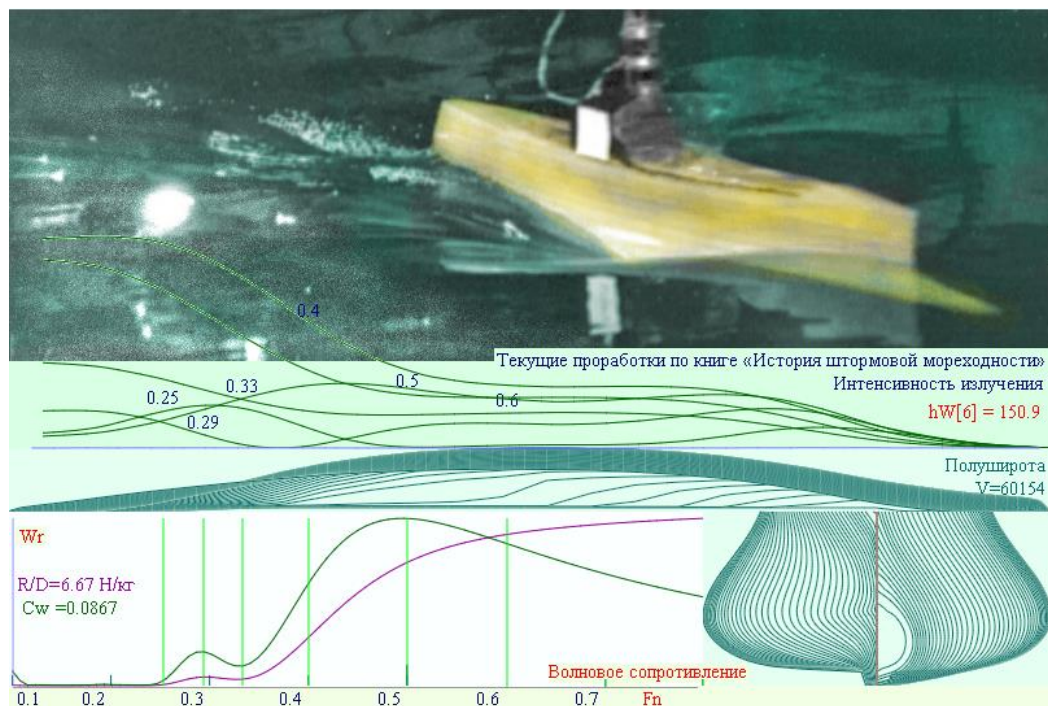


Рис. 14. Обводы носовой скулы модели МИДВ-85 лишь отчасти учитывают необходимость плавного затягивания встречного набегающего под днище корпуса, отчего в расчетах проявляется экстремум на кривой волнового сопротивления на скорости $F_n = 0,3$. В эксперименте, верхнее фото, модель показывает образование крутой расходящейся корабельной волны, которая в противофазе вместо отрыва от борта начинает оголять днище корпуса за пределами носовой скулы.

В результате расчётов волнового сопротивления получается, что 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 $Fn \geq 0.5$, обусловливаемым весьма заметным завалом борта на уровне действующей ватерлинии.

В экспериментах в опытовом бассейне Ленинградского кораблестроительного института (Рис. 14) модель с малыми моментами инерции площади действующей ватерлинии (МИДВ-85) проходила испытания в большом диапазоне изменяемых осадок. Наилучшим вариантом по ходкости и мореходности в условиях интенсивного волнения стал выбор осадки, при котором на уровне действующей ватерлинии ветви шпангоута приводились к точке перегиба [Поисковые..., 2004], что также означает наибольший угол завала борта на уровне ватерлинии.

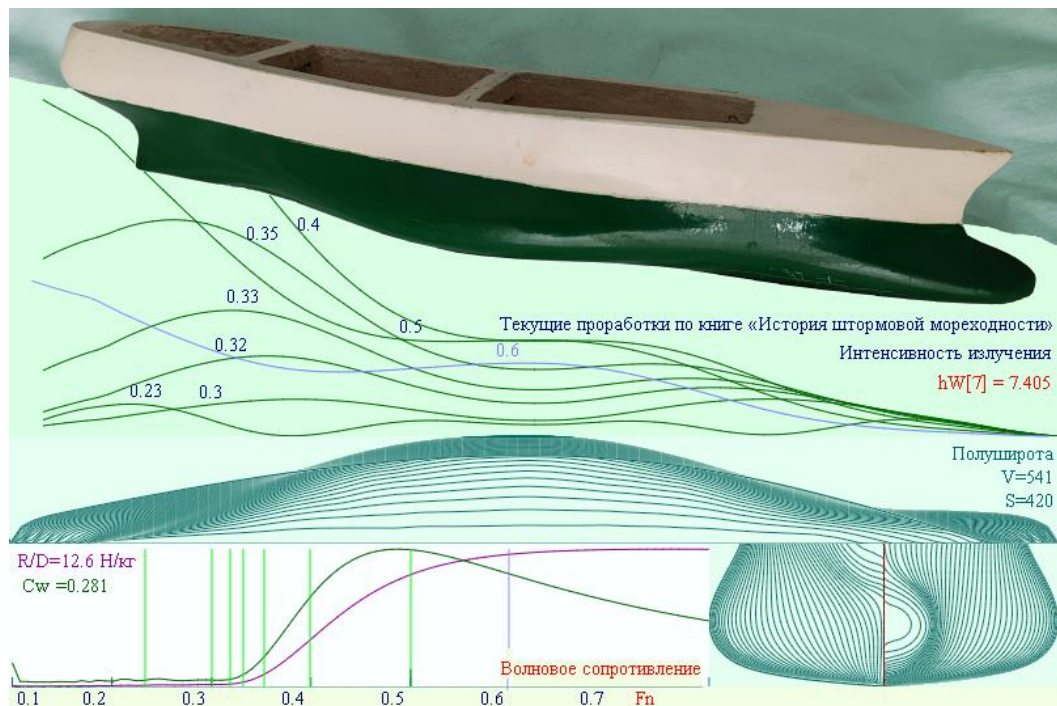


Рис. 15. Аналогичные оценки интенсивности корабельного волнообразования и волнового сопротивления для обновлённых в 1987 году обводов корпуса со скуловыми сужениями носовых и кормовых ветвей шпангоутов для плавного сопряжения набегающих потоков между бортовыми и днищевыми поверхностями.

Сравнительные испытания гиперболизованной модели МИДВ-85 в сопоставлении с быстроходным судном 60-серии ($\delta = 0,572$) подтверждали значительно лучшие ходовые и мореходные качества (Рис. 23) на всех скоростях штормового хода на умеренном и крупном волнении. Формально это означает, что концепция эволюционного развития представлений о наилучшей форме корпуса корабля справедлива, а последующие проекты пяти кораблей и судов повышенной штормовой мореходности, построенные и оптимизированные с перспективой практической эксплуатации в реальной морской практике, в экспериментах на волнении в опытовом бассейне Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета также показывали превосходные мореходные качества в сравнении с моделями МИДВ-85 и 60-серии.

В другом примере (Рис. 15), со специально разработанной моделью 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 $F_n \approx 0.35$. Некоторое превышение волнового сопротивления на $F_n \approx 0.5$ здесь объясняется относительно широким корпусом с меньшим завалом борта на уровне действующей ватерлинии, что соответствует оценкам влияния на удельное волновое сопротивление от 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 дифференциал на нос. На относительно длинной волне наблюдалась взаимокompенсация 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.

Проверяя рукой плавность подводных обводов в носовой оконечности модели крейсера «Аврора» можно выявить небольшую выпуклую округлость ветвей носовых шпангоутов, означающую своеобразный огрех с устройением «системы струйного» увеличения полноты корпуса и водоизмещения корабля за счёт искажения плавности набегающего потока на ходу корабля, с частичным ухудшением мореходных качеств в условиях интенсивного морского волнения.

Такое увеличение полноты допустимо для малых кораблей, типа миноносца «Касатка», так как для расчетной скорости хода по Фруду более чем $F_n > 0,5$, интенсивность корабельного волнообразования зависит только от формы мидельшпангоута. Однако, простота «струйного обтекания» может быть оправдываема только для тихой воды, так как для корабля малого водоизмещения не снимаются проблемы резкой килевой качки при искусственном завышении силового воздействия со стороны умеренного морского волнения.

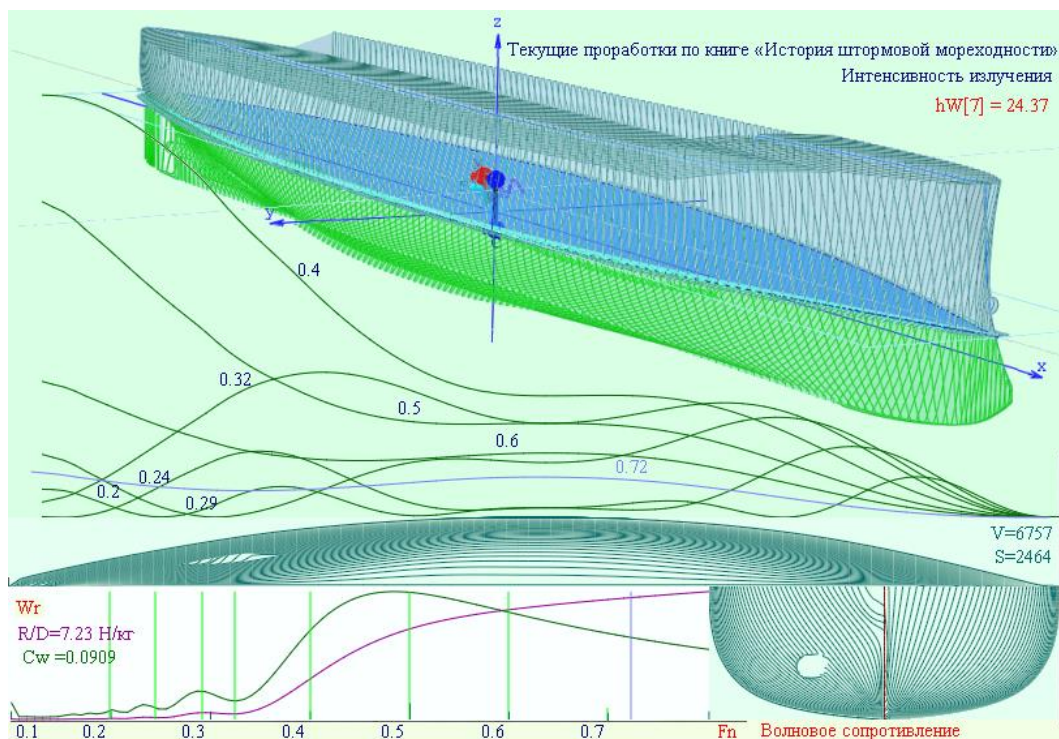


Рис. 16. Результаты расчётов интенсивности корабельного волнообразования и волнового сопротивления для крейсера I-ранга «Аврора».

Обводы корпуса крейсера «Аврора» справедливо оценивать практически идеальными в плане всепогодной мореходности, и в целом по штормовой ходкости (Рис. 16) и плавности качки (Рис. 6), что выше уже обосновывалось при анализе остойчивости, гидростатики и гидромеханики силового воздействия на корпус корабля гребней девятых валов и прогрессивных штормовых волн и зыби.

В обводах крейсера «Аврора» упоминаемое здесь негативное искажение скуловых обводов очень слабое, тем не менее, расчеты корабельного волнообразования и волнового сопротивления выявляют вполне заметное проявление экстремумов по высоте и крутизне расходящейся корабельной волны (Рис. 16), и как следствие, прогнозируется несколько большая интенсивность силового воздействия штормовых волн с соизмеримыми характеристиками по фазовой скорости $Fn \approx 0,33$, набегающих извне на корпус корабля.

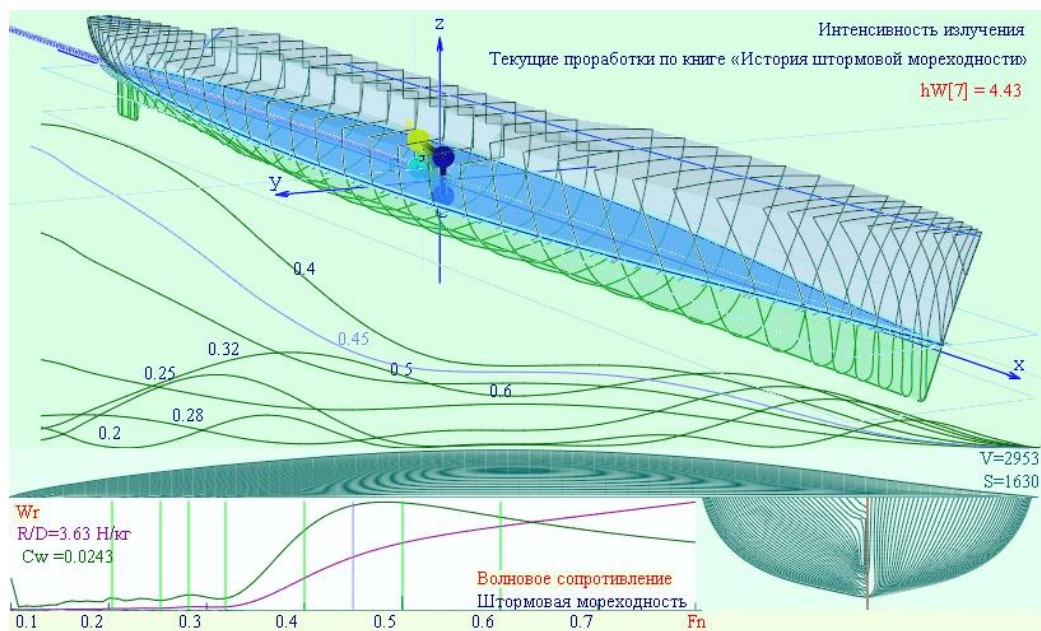


Рис. 17. Лидер эсминцев «Ташкент» итальянской постройки – образец формирования V-образных клиперских скуловых обводов как в носовой, так и в кормовой оконечностях корабля.

Совершенными в рассматриваемом контексте являются обводы иностранного корабля – итальянского проекта быстроходного корабля с проектной скоростью хода до 44,5 узлов. Это легендарный лидер эсминцев «Ташкент», заложенный в 1935 году на верфи в Ливорно по проекту

судоостроительной компании «Одеро-Терни-Орландо» (*Odero-Terni-Orlando Società per la Costruzione di Navi*).

Лидер «Ташкент» отличался особой ходкостью (Рис. 17), достигая на длинных переходах более $V = 41$ узлов скорости, что по Фруду 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 на скорости $V > 40$ более узлов до остаточных $\psi \approx 0^\circ 2'$ двух угловых минут.

Клиперские V-образные обводы по носовой скуле приводят к плавному закручиванию встречного потока под днище ближе к средней части корпуса. Ветви кормовых шпангоутов лидера «Ташкент» также обретают треугольную форму в сторону кормового подзора. Обводы корабля удовлетворяют требованию значительного уменьшения волнообразующей длины корпуса. На ходу встречный поток плавно затягивается под днище корабля, что способствует гашению расходящейся корабельной волны (Рис. 17), и в соответствии с принципом взаимности излучения и отражения в гидромеханике волновых процессов обеспечивается стабилизации килевой качки, как это оговаривается в изобретении¹¹ «Корабль без килевой качки на ходу на волнении». Таким образом достигается непротиворечивое и взаимодополняющее согласование всего комплекса проектных предпосылок в построении обводов корпуса и общекорабельной архитектуры корабля.

Экспериментальная проверка концептуального решения (Рис. 18, два фото внизу) превзошла прогнозы частичного ослабления килевой качки. Визуально корпус удерживался строго горизонтально¹², килевая качка не наблюдалась вовсе, что формально представляется трансформацией угловых колебаний в чисто поступательные вертикальные.

¹¹ «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.

¹² 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.

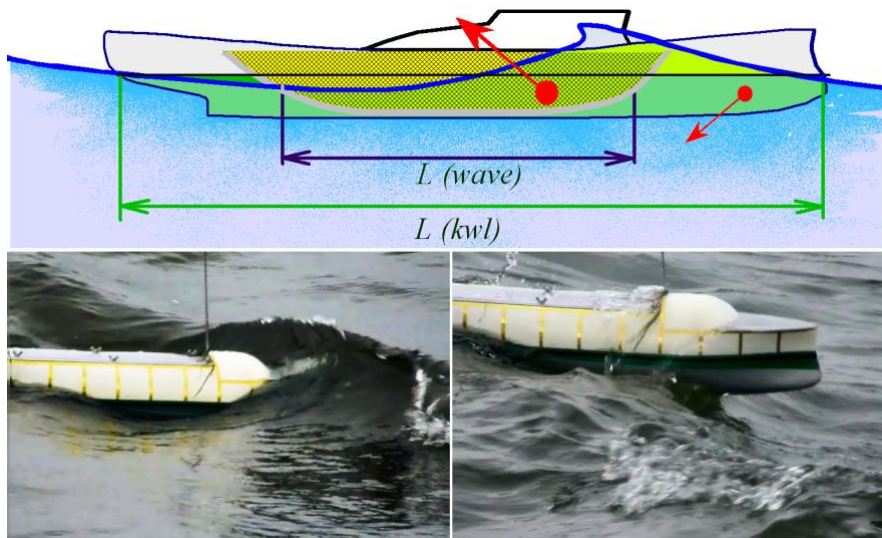


Рис. 18. Гидромеханика килевой качки интерпретируется с использованием исторического понятия волнообразующей – волнопринимающей длины корпуса $L(\text{wave})$, за пределами которой на $L(\text{kwl})$ корпус подпадает под прямые удары прогрессивных трохоидальных волн, где скуловые обводы и относительно низкий надводный борт должны способствовать стабилизации качки

Рисунок **выше** иллюстрирует 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 увеличению угла закручивания потока для создания большего разрежения в зоне образования гребня носовой расходящейся корабельной волны.

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.

В экспериментах на ветровом волнении, при остановке двигателей и потере хода, модель корабля приводится к естественному состоянию с сильной

килевой качкой удлинённого тела под гидростатическим воздействием трохидальных гребней штормовых волн.

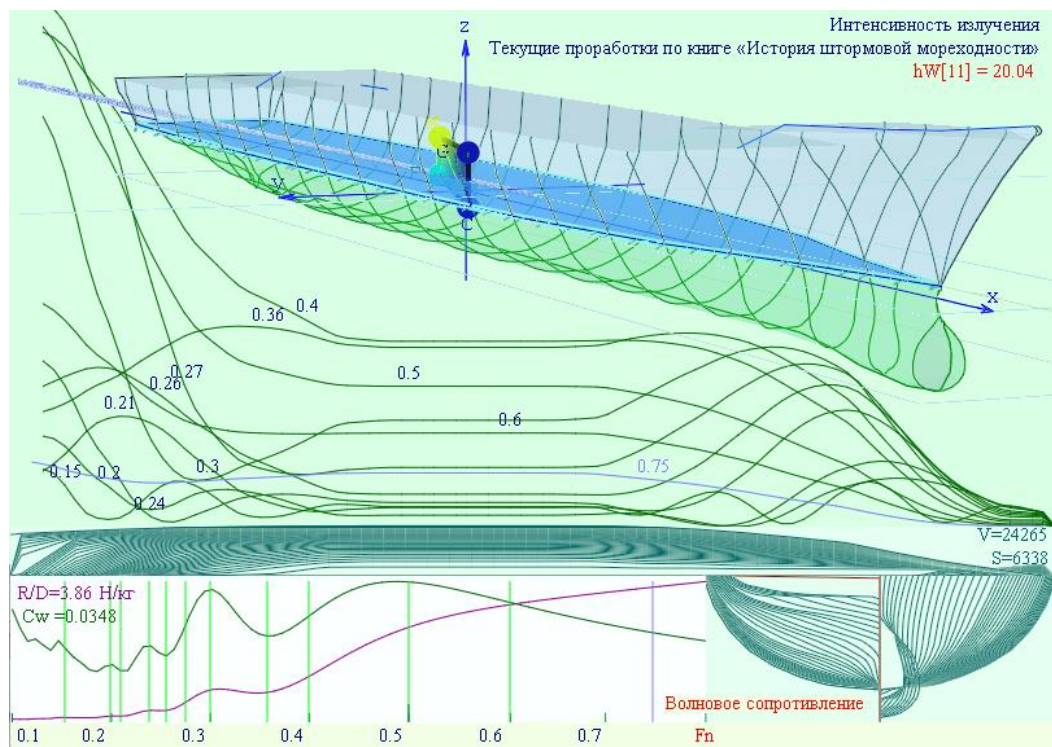


Рис. 19. Крейсер «Киров» с эквидистантными ватерлиниями «струйной системы обтекания» по носовой скуле.

Здесь допустимо предварительное замечание, что негативные штормовые мореходные качества усугубляются килевой качкой и рысканием при развесистом развале надводных ветвей носовых шпангоутов и форштевня; при широкой транцевой консоли в кормовой оконечности (Рис. 19), создающими чрезмерные пульсации внешних сил под воздействием штормовых волн. Другой корабль для сопоставления ходкости будет вполне современным, с удивительно похожими на «Ташкентские» обводы в средней части корпуса, и это крейсер «Киров» из эпохи 80-годов СССР.

Атомный крейсер «Киров»¹³ в принципе не нуждается в гигантских запасах топлива, и потому может обладать малым коэффициентом общей полноты корпуса, с красивым округлым оформлением контуров шпангоутов в средней

¹³ Цифровая модель «Кирова» лишь в целом похожа на обводы настоящего корабля, но всё же, обобщённые выводы по отчасти искаженному корпусу не утрачивают актуальности.

части корабля. Но всё же, если у лидера «Ташкент» (Рис. 17) пик сопротивления на скорости $F_n = 0,25$ всего $R/D=0,025$ [Н/кг], то у крейсера «Киров» почти на порядок больше $R/D=0,22$ [Н/кг].

По-видимому, на результаты расчётов по Мичеллу влияют огрехи интерференционных нарушений у транцевой кормы «Кирова», где вместо гладкого заострения ватерлинии образуют сломы на транцевых срезах, отчего подынтегральные функции с источниками волнообразования – как градиенты на смоченной поверхности корпуса терпят разрывы, разрывы продольных производных.

Тем не менее, для сверх больших скоростей хода, по $F_n \geq 0,8$, максимумы величин волнового сопротивления вполне сопоставимы. Для «Ташкента» и «Кирова», что характеризует сходные размерения корпусов и неплохие гидродинамические качества мидельшпангоутов обоих кораблей.

В зоне скуловых обводов крейсера, за бульбовым форштевнем всё могло бы быть существенно лучше. Хорошо отлаженный бульб должен в помощь клиперским обводам и без нарушения плавности усиливать закручивание потока под днище корпуса корабля, как это устроено у лидера «Ташкент» (Рис. 17). Замена V-образных шпангоутов эквидистантными ватерлиниями с полными U-контурами из «системы струйного обтекания» приводит лишь к кратному увеличению интенсивности пакета расходящихся корабельных волн, и как следствие к значительному усилению штормового воздействия на корпус корабля (что может быть признано проектным просчётом).

Вопросы ослабления килевой качки могут рассматриваться в качестве обратной математической задачи корабельного волнообразования на всех, включая закритически высоких скоростях хода корабля [Поисковые..., 2004]. 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.

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 или эмпирическими постоянными интегрирования. В то же время, недоопределённые параметры численной аппроксимации в едином расчётном алгоритме не

оказывают существенного влияния на результаты внутри малых интервалов интегрирования. Собственно форма кривых волнового сопротивления и соотношения величин волнового сопротивления для разных скоростей хода конкретного корабля, могут считаться вполне приемлемыми решениями сложной задачи гидромеханики для проектного оценивания и практического использования в кораблестроительной практике.

Опытные испытания и сравнительная апробация современных, гипотетических и эволюционных обводов корпуса корабля

Первые полноценные и комплексные испытания гипотетической модели МИДВ-85 проводились в 1985 году под руководством и при участии профессора кафедры теории корабля Александра Николаевича Холодилина. В проект опытовой модели (Рис. 7 и Рис. 14) закладывалось экстраполяционное усиление эволюционной трансформации обводов и общекорабельной архитектуры исторических кораблей и судов конца XIX – начала XX веков, проектировавшихся при непосредственном участии мореплавателей. Для адекватного сопоставления экспериментов со стандартными и общепризнанными историческими сериями модельных испытаний, в серию опытов в том же измерительном окружении включались учебная модель быстроходного судна 60-серии с коэффициентом общей полноты $\delta = 0,572$; и эталонная модель судна «Victory» с несколько большей полнотой корпуса: $\delta = 0,675$, но отвечающих эстетически безупречным проектным воззрениям корабельных инженеров второй половины XX века.

Гидродинамической особенностью и достоинством мореходных экспериментов в Ленинградском кораблестроительном институте представляется уникальная гравитационная система опытового бассейна кафедры теории корабля, обеспечившая заданную тягу, аналогично штормовому ходу с работающими маршевыми двигателями. При этом модели судов оснащались гироскопическими регистраторами углов крена и дифферента, а электронная следящая система синхронизировала движение тележки строго над моделью для поддержания жгута кабелей измерительной телеметрии, и попутно регистрировались мгновенные значения скорости хода, а для фиксации времени и осредненной скорости на «мерном отрезке» срабатывали датчики времени от светодиодов. Для выделения из полного сопротивления движению моделей волновой составляющей, связанной с интенсивностью продольного и поперечного корабельного волнообразования, задействовались струнные волнографы.

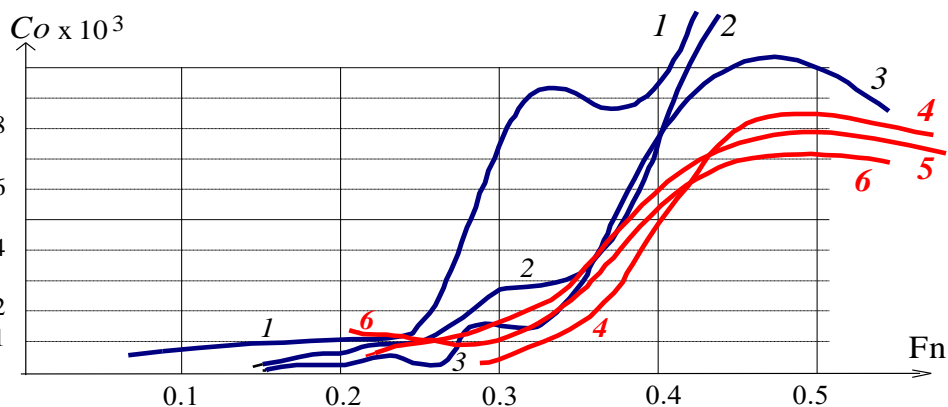


Рис. 20. Сравнительные кривые коэффициентов остаточного сопротивления моделей.
 1. Эталонная модель «Victory»; 2. Модель 60-й серии; 3. МИДВ, осадка: $T=135$ мм;
 4. $T=125$ мм; 5. $\Delta T=40$ мм на корму; 6. - ход кормой вперед; 1÷3 – испытание в
 гравитационной системе; 4÷6 – под буксировочной тележкой.

На исходном этапе проводились испытания модели МИДВ-85 на тихой воде с целью определения наилучшей по удельному сопротивлению посадки корпуса, в максимально широком диапазоне изменения осадок и дифферентов, охватывающими как бы своеобразную серию с различающимся завалом/развалом и характером кривизны шпангоутов на уровне действующей ватерлинии (Рис. 20 – кривые 3÷6), отчего в проекте обводов модели МИДВ предусматривалось построение теоретических ватерлиний в оконечностях равноудалённо одна от другой, что впоследствии сказалось усилением корабельного волнообразования вблизи скуловых обводов в оконечностях корпуса.

При выделении остаточного сопротивления (волнового и формы) модели использовался стандартный коэффициент ИТТС¹⁴⁻⁵⁷ для оценки величины трения эквивалентной пластины: $C_F = 0,075 / (\log_{10} Rn - 2)^2$.

Оптимальная по ходкости посадка модели МИДВ получилась при выборе осадки $T = 125$ мм с дифферентом $\Delta T = 20$ мм на корму. Как и ожидалось, визуально по графикам удельного остаточного сопротивления, посадка корпуса соответствовала максимальному завалу борта на уровне действующей ватерлинии, что соответствует *точке перегиба контура мидельшпангоута*, и в варианте с фактическим устранением избыточного (*излишнего*) заглубления носового бульба.

¹⁴ — 8th International Towing Tank Conference, Madrid, Spanish, September 1957,
 $C_F = 0,070 \cdot (\log_{10} Rn - 2,12)^{-2}$

Одновременно, в испытаниях на тихой воде за несколько прогонов подбирался разгонный импульс для быстрого приведения модели к заданной скорости хода, который затем востребовался для установления начальной скорости в мореходных экспериментах на встречном и попутном волнении. Скорость движения модели при заданной гравитационной тяге свободно пульсирует, вплоть до возвратного хода под ударами гребней встречных волн, что единственно соответствует реальной ходкости корабля в штормовых условиях плавания.

По графикам (Рис. 20) подтверждаются результаты численных расчётов волнового сопротивления, прогнозировавших улучшение ходкости на больших скоростях хода при $Fn \geq 0,5$, которое достигается за счет завала бортов и уменьшения ширины действующей ватерлинии в средней части корпуса. На осциллограммах волнографа также подтверждалось, что максимальная высота корабельной волны проявляется на скорости хода $Fn \approx 0,5$, затем высота волны снижается, что объясняется стабилизацией динамической посадки корпуса за счёт завала бортов в районе действующей ватерлинии (вместо привычного ходового дифферента проявляется взаимокompенсация эффектом «антиглиссирования»). Для моделей с традиционными обводами 60-серии и «Victory» превышение скоростей хода выше $Fn > 0,5$ представлялось противоестественным и опасным в плане возможного повреждения моделей, гравитационной тяги и измерительной оснастки.

В вычислительных экспериментах подтверждается, что экстремумы удельного по водоизмещению волнового сопротивления приводятся к одинаковым отсчётам относительных скоростей хода по числам Фруда, а форма и величины зависят формы и размерений корпуса. Все три опытовые модели имели схожие соотношения размерностей корпуса, и поэтому по ходкости на тихой воде были выбраны три режима гравитационной тяги (Рис. 21), как: $R_x/D \leq 0.1$ [Н/кг] – средний ход; $R_x/D \leq 0.2$ – полный ход; $R_x/D \leq 0.3$ – форсированный ход.

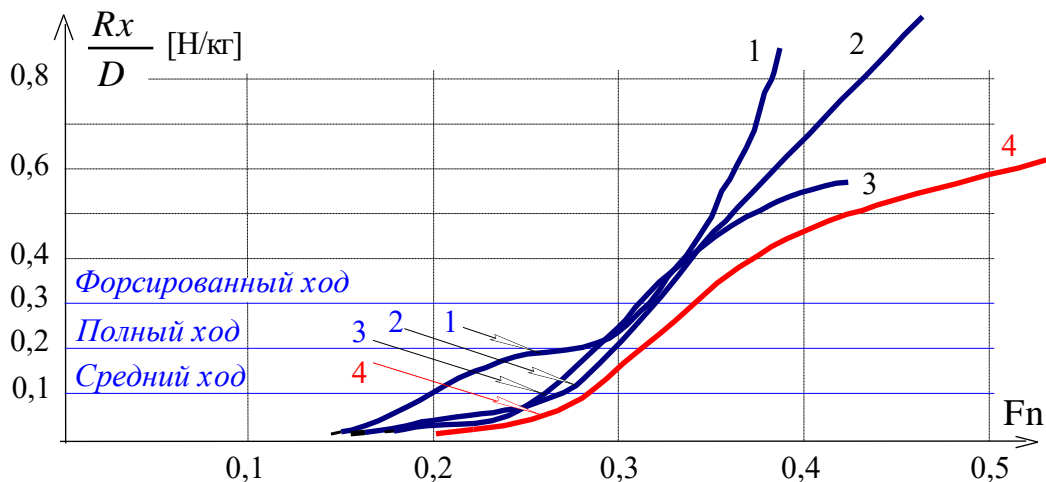


Рис. 21. Удельное остаточное сопротивление моделей. 1. «Victory»; 2. 60-й серии; 3. МИДВ, $T = 135$ мм; 4. МИДВ при оптимизированной посадке: $T=125$ мм; $\Delta T=20$ мм на корму. 1÷3 - испытание в гравитационной системе; 4 - на буксировочной тележке.

1. *Форсированный ход* $R_x/D = 0,3$ [Н/Кг] – соответствует форсированному ходу военных кораблей или предельной ходкости быстроходных транспортных судов (*верхний рисунок*)
2. *Полный ход* $R_x/D = 0,2$ [Н/Кг]. Главные двигатели работают в расчётном режиме, соответствующем экономичному ходу (*средний рисунок*);
3. *Средний ход* $R_x/D = 0,1$ [Н/Кг]. Режим безопасного хода на крупном волнении или штормования (*нижний рисунок*).

Сравнительные результаты испытаний по ходкости на волнении представляются в виде графиков потери хода моделей МИДВ и быстроходного судна 60-й серии (**Рис. 22**). Аргументом выбрана относительная длина волны, соразмеренная с длиной корпуса испытываемой модели $l = \lambda / L$, где длина волны λ вычисляется по периоду времени одного такта волнопродуктора: $\lambda = g \cdot T^2 / 2\pi$, что следует из дисперсионного соотношения для волн на глубокой воде: $\omega^2 = g \cdot k$, $\omega = 2 \cdot \pi / T$, $k = 2 \cdot \pi / \lambda$.

Величины потери хода на волнении сняты с буксировочных кривых и соотнесены со скоростью моделей на тихой воде: $\Delta V = (F_{n_0} - F_{n_v}) / F_{n_0}$, где L – расчетная длина корпуса испытываемой модели; F_{n_0} – скорость по Фруду на тихой воде; F_{n_v} – интегральная скорость движения модели с той же тягой на волнении.

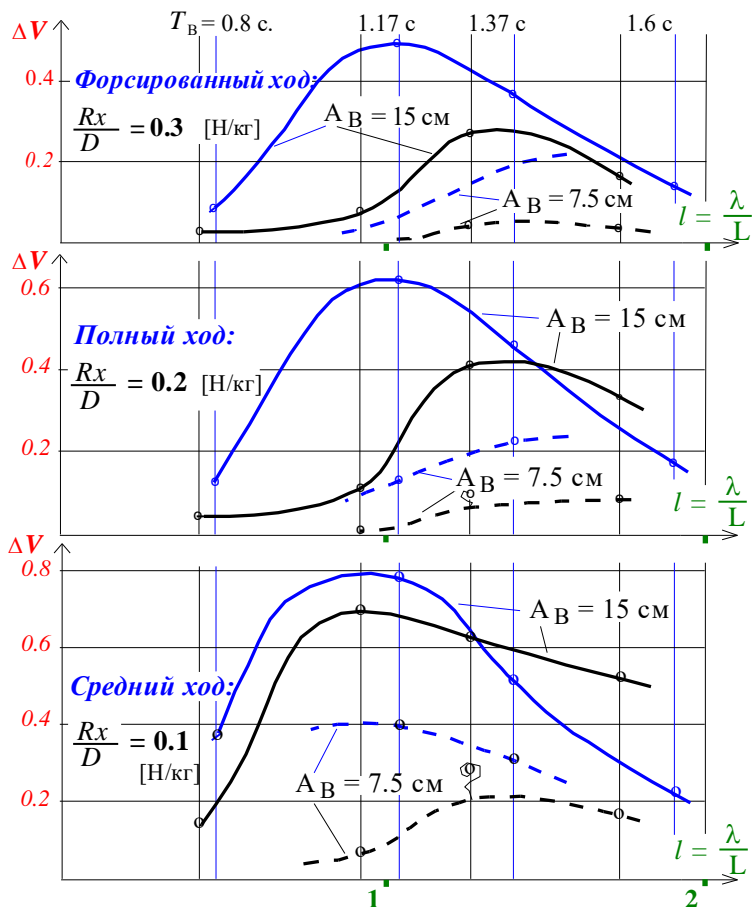


Рис. 22. Сравнение величин потери хода на волнении модели с корпусом МИДВ (черные кривые) и модели быстроходного судна 60-й серии с $\delta=0.572$ (синие кривые).

На графиках приводятся по две пары кривых потери хода на волнении для модели МИДВ – чёрного цвета, и модели 60-й серии – цвета синего. Графики со сплошными линиями соответствуют амплитуде встречной волны равной осадке модели $A_B = 15$ см, и пунктирные – для волны в половину осадки $A_B = 7,5$ см.

При длине волны в полтора-два раза больше волнообразующей длины корпуса корабля, традиционные обводы на средних ходах проявляют некоторое преимущество по штормовой ходкости, корабль начинает отслеживать поверхность волны без видимого проявления собственных периодов килевой качки, в отличие от корпуса с предельно малым моментом инерции площади ватерлинии относительно поперечной оси.

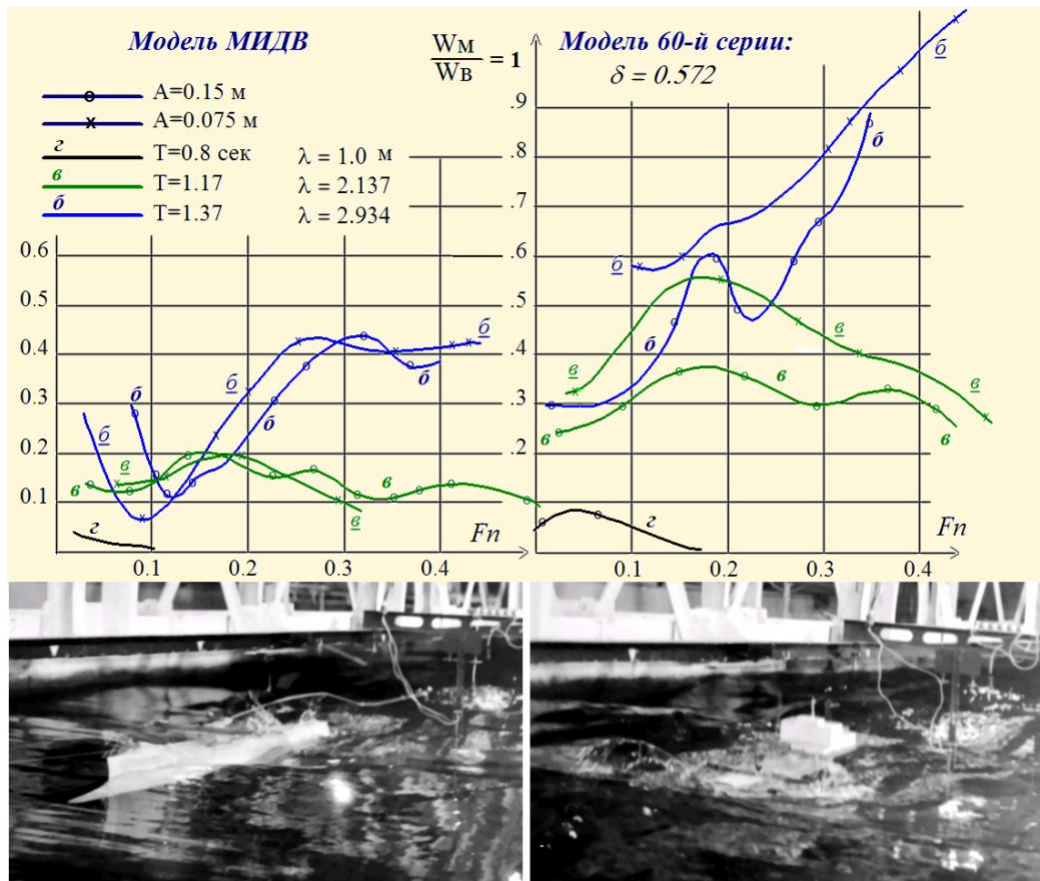


Рис. 23. Интенсивность килевой качки в зависимости от скорости хода в различных условиях встречного регулярного волнения с нормировкой на вертикальные ускорения частиц жидкости в гребне волны. По вертикальной шкале соотношение ускорения в оконечностях моделей в сравнении с вертикальными ускорениями в гребнях морских волн. Левый рисунок – модель МИДВ, правый – 60-й серии

К сожалению, это лишь формальное подтверждение переноса мореходных качеств малого прогулочного флота на крупнотоннажных океанские корабли и суда, – что сродни огульному употреблению воззрений из технической эстетики. Крупные корабли не могут обладать столь же гигантской относительной прочностью, а свойственные малым плавсредствам вертикальные ускорения с регулярным проявлениями невесомости, на борту широкопалубных судов (Рис. 23, кривая $\bar{\bar{\theta}}$ справа) означают возникновение опасности отрыва грузов от палубы, и в таком случае могут расцениваться исключительно с позиций неминуемости морских катастроф.

К тому же, приведенное на графиках (Рис. 22) преимущество в ходкости может проявляться только в сравнении с результатами испытаний гиперболизированных обводов конкретной модели МИДВ, которая строилась для проведения опытовых испытаний в широком диапазоне переменных осадок и дифферентов, что сказалось раскрепощением свободной вертикальной качки. Далее будет показано, что элементарная практическая адаптации обводов МИДВ к реальной морской практике значительно улучшит все показатели мореходности нового эволюционного построения корабельных обводов.

На Рис. 23 представлены величины ускорений в оконечностях корпуса, обезразмеренные по величине $W_B = \omega^2 \cdot A = 4\pi^2 \cdot A/T$ – относительно ускорений частиц жидкости на свободной поверхности в гребне прогрессивной штормовой волны. В случае обрушающегося гребня, ускорение в гребне волны достигает g – ускорения свободного падения.

В построении рисунков учтен осредненный (среднестабильный) размах килевой качки, с экстремальными всплесками в записях бортового гиروهоризонта в полтора раза-два большими.

Уменьшение динамического взаимодействия корпуса с морским волнением, отдаление резонанса на более низкие частоты собственных колебаний корпуса по всем видам качки в 1,5-2,5 раза снижают размах качки при сравнении с аналогичной динамикой традиционного быстроходного судна (*с малым коэффициентом общей полноты корпуса*).

В целом, опытовые испытания, также как и вычислительные эксперименты, в полной мере подтверждают улучшение штормовой ходкости и снижение качки гипотетического судна с уменьшенными поперечными и продольными моментами инерции площади действующей ватерлинии (МИДВ-85).

[Всепогодный океанский флот Главного управления кораблестроения России 2001 года](#)

В развитие и обоснование проектных изысканий, в 2004 году по гранту нефтепромышленной компании «Сахалинская энергия» строилось пять самоходных телеуправляемых моделей кораблей и судов повышенной штормовой мореходности. Четыре модели были представлены к мореходным испытаниям в опытовом бассейне Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, из них три модели: корвет, буксир и транспортное судно – успешно прошли запланированный цикл экспериментов без существенных замечаний

Свободное движение новых опытовых моделей проводилось под дистанционным управлением рулями и маршевыми электродвигателями. Опорные оценки ходкости предварительно определялись в испытаниях на тихой воде, которые затем использовались в предустановках мощности двигателей в экспериментах на интенсивном встречном и попутном трохoidalном волнении. Задействовались два режима мощности двигателей для полного и среднего хода, с условно половинной тягой. Однако, в условиях интенсивного волнения ходкость в большей степени зависела от стабильности работы гребных винтов. Так, по четвертой модели, модели траулера с плохо отработанными обводами кормового подзора, штормовые испытания признаны некорректными, ввиду частого оголения гребного винта на умеренной по интенсивности килевой и вертикальной качке.

Непрерывное измерение скорости хода, бортовой и килевой качки выполнялось цифровыми измерительными приборами, с выдачей всей измерительной информации на регистрирующий компьютер по цифровому радиоканалу. Дополнительная визуальная оценка мореходных качеств моделей в целом, так же как и вспомогательные измерения динамики движения и взаимодействия с гребнями крутых волн проводились по видеозаписям, регистрировавшим кинематику самоходных моделей и гребней волн относительно специально размеченных маркеров на внутренних бортах опытового бассейна.

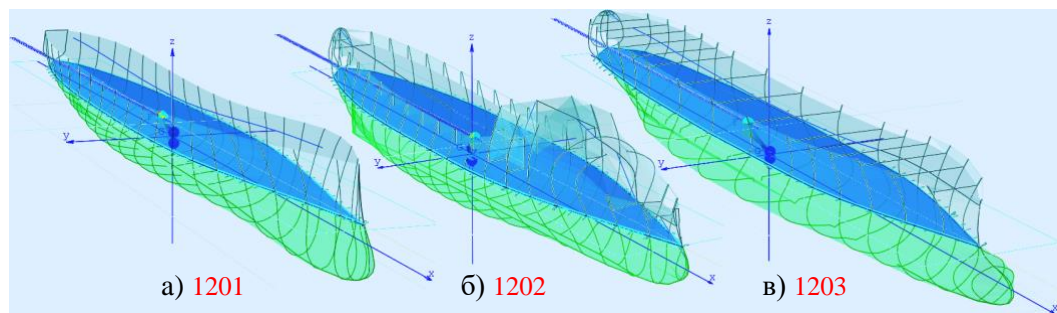


Рис. 24. Прорисовки цифровых моделей для трёх (из пяти) проектов кораблей и судов, разработанных в рамках контракта Главного управления кораблестроения России в 2001 году, и успешно прошедших полный цикл мореходных испытаний в опытовом бассейне Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Условные названия моделей: а) корвет-1021; б) буксир-1202; в) транспортное судно-1203.

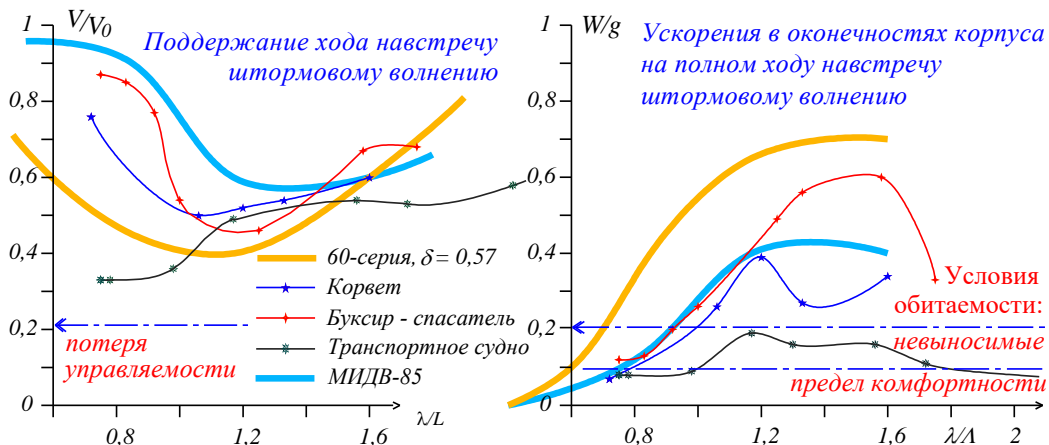


Рис. 25. Обобщенные результаты опытовых испытаний ходкости (слева) и килевой качки (справа) моделей судов, оптимизированных для штормового плавания. Как и ожидалось, ходовые качества моделей перспективных судов оказались несколько лучшими, чем у традиционного быстроходного судна 60-серии, но худшими в сравнении с гипотетическим судном МИДВ-85. В то же время все проекты новых судов подтвердили превосходные результаты по условиям обитаемости в штормовых условиях.

На графиках ходкости и качки (Рис. 25, слева) специальными значками отмечены все результаты телеизмерений, которые при сопоставлении с оценками наблюдений по видеозаписям признаны вполне достоверными.

Мореходные испытания моделей судов в гравитационной системе, и особо опыт работы с телеуправляемыми моделями, позволяют сделать проектные и эксплуатационные оценки мореходных качеств испытываемых судов в сложных и штормовых условиях плавания. Дополнительные предложения по мореходным качествам самоходных моделей готовились также на основе многочисленных видеозаписей в открытом море, где испытания моделей проводились на настоящем ветровом нерегулярном волнении.

Оценки мореходности могут становиться предзнаменованием морских катастроф, и потому за ними должен следовать существенный пересмотр проекта обводов или общекорабельной архитектуры судна, либо – их обязательное включение в наставления мореплавателям по недопущению опасных режимов штормового плавания действующих кораблей и судов. Например:

– Модель судна 60-серии на предельно малом ходу навстречу волне высотой в половину осадки и длиной равной длине корпуса ушла с курса и вырвала коромысло тросового ромба гравитационной упряжки. Корпус нуждается в штормовом подрезе форштевня для возможности свободного

рыскания на волне, а также в уменьшении надводного объема бака для исключения интенсивной килевой качки;

– Самоходные модели судов теряют управляемость и приводятся на курс лагом к волне, если скорость хода снижается до 20 % от ходкости на спокойной воде. Корпус судна не должен испытывать сильных ударов волн и слеминга на скорости хода порядка 30 % от исходной на тихой воде, что достигается уменьшением высоты борта и уменьшением моментов инерции площади действующей ватерлинии в активном диапазоне штормовых осадок;

– Оптимизированные для штормового плавания модели судов показывают значительное уменьшение килевой качки на полных ходах в условиях интенсивного волнения. Судоводителям следует выбирать режимы штормового плавания на повышенных скоростях хода для снижения качки и повышения комфортности обитания на борту судна;

– Все испытанные самоходные модели судов теряют управляемость на малых ходах при движении по крупной волне, и обретают опасную способность к захвату корпуса волной и стремительной циркуляции (бродингу). Судоводителям не следует снижать ход при движении по волне, если же мощностей главных машин недостаточно для поддержания управляемости и уверенного движения по волне, то следует встать на курс лагом, вразрез или навстречу штормовой волне для восстановления управляемости.

В мореходных испытаниях модели транспортного судна и патрульного корабля обнаружено практически полное гашение бортовой качки на любом курсе на ходу и без хода [3], что означает компенсацию внешнего силового воздействия со стороны морского волнения. Однако на циркуляции или под действием ветра эти модели проявляют вполне заметный крен. Это соответствует аналитическому выводу о следствиях компенсации главных возмущающих сил, в результате чего судно становится чувствительным к инородным нелинейным эффектам, которые в традиционном проектировании считаются несущественными.

Как вариант компенсации этих относительно слабых возмущений, предлагается к использованию унифицированное устройство активной стабилизации остаточной килевой и бортовой качки оптимизированного корпуса (Рис. 25, справа), согласованное в действии с пассивным механизмом аварийного поддержания штормового хода и управляемости после остановки главных машин. Возможность полезного использования такого крыльевого устройства в штатном и аварийном режимах плавания служит показательным примером непротиворечивого проектирования сложной морской техники.

Постановка и проведение прямых вычислительных экспериментов с кораблём в штормовом море

Ко времени отработки комплекса математических моделей, к началу работ с построением прямых вычислительных экспериментов, в целом были синтезированы концептуальные подходы к проектированию обводов и внешнего облика всепогодного корабля по результатам серии мореходных испытаний на интенсивном волнении в опытовых бассейнах кафедры теории корабля Ленинградского кораблестроительного института и кафедры кораблестроения в Комсомольском-на-Амуре государственном техническом университете.

В расширение исходных представлений о хорошей морской практике систематизировались наблюдения штормовой мореходности по многочисленным экспериментам с телеуправляемыми моделями на ветрах с интенсивным волнением в открытых морских и озёрных акваториях Сахалинской области, где в проектных новациях задействовались массивы данных с бортовых измерителей ходкости и качки самоходных моделей кораблей и судов.

Завершающие этапы опытовых испытаний моделей обычно предполагали возможность возникновения аварийных ситуаций и катастроф на предельно высокой и крутой волне, например с возникновением брочинга или опрокидыванием моделей в свободном плавании под гравитационной тягой или на собственном ходу. Но всё же, случайные проявления морских опасностей для опытовых моделей никак не сводятся к цельным изысканиям с адекватным освоением искусства штормового кораблевождения, где главной целью является эффективность корабля с соответствием с предназначением в любых погодных условиях, и в сложном навигационном окружении.

К тому же, в полноценных мореходных испытаниях участвовали лишь проекты сахалинских моделей перспективных судов с обводами и общекорабельной архитектурой повышенной штормовой мореходности, для которых внешне несущественные улучшения геометрии корпуса приводили к «абсолютно» естественным и совершенно безопасным условиям маневрирования на предельно крутой штормовой обрушающейся волне открытого моря (*в том числе под высотой волн более соизмеримой с длиной корпуса самоходной модели*).

Сопоставление результатов мореходных испытаний модели МИДВ-85 с хорошо изученной моделью 60-й серии, и эталонной моделью судна «Victory» выполнялось только в 1985 году в большой последовательности специальных экспериментов в опытовом бассейне Ленинградского кораблестроительного

института. В экспериментах тех лет складывалось общее впечатление, что чем круче и выше волна, вплоть до выплёскивания гребней через борта бассейна, тем естественнее штормовое плавание для гипотетического судна с малой инерцией действующей ватерлинии (МИДВ), и чем меньше его остойчивость – тем меньше размах качки. Бережное отношение к особо ценным стандартным моделям не предполагало экстремальных экспериментов с нарушениями безопасности и сохранности моделей и оснастки на крутой волне.

Но всё же, единичный аварийный случай прервал цикл испытаний с моделью 60-й серии на самых малых ходах на умеренном встречном волнении, когда скорость хода в гравитационной тяге пульсировала с откатами до заднего хода. Примерно на середине «мерной мили» модель остановилась, затем с громким треском выломано весьма прочное крепление тросовой упряжки, что произошло в результате некоего «параметрического резонанса» или «бручинга» по правому крену и рысканию вправо по курсу, с быстрым уходом вправо с линии фарватера (в случае левого крена упряжка могла бы приподнять и выдернуть модель из воды). С большей тягой в гравитационной упряжке модель хода боле не теряла, и других аварийных ситуаций не создавалось.

Лишь подобные случайные катастрофы с моделями на регулярном волнении в опытовом бассейне никак не могут служить проектным обоснованиям повышенной штормовой мореходности перспективного корабля.

В ходе морских экспериментов с моделями под ветром и по волне на открытой воде, к сожалению, существовала проблема интерактивных оценок состояния модели и текущих режимов дистанционного управления непосредственно в процессе опытовых экспериментов. К сожалению, в те времена (как и сейчас) имеется возможность использования только «спортивно-бытовой» аппаратуры, в которой искусственного разделяются цифровые радиоканалы для телеметрии и телеуправления, отчего в результатах получается некая бессистемность телеметрических измерений с плохо определёнными режимами телеуправления. Идеальным было бы проведение всех экспериментальных работ под управлением единой компьютерной программе, как при назначении курса и скорости хода, так и при регистрации ответной динамики качки и ходкости без участия берегового оператора. Вкупе с недостаточной прозорливостью или неверными предпочтениями экспериментаторов, новые проектные заключения сохраняют более эвристический характер, нежели обоснования строгими и однозначными теоретическими заключениями по обводам корпуса и общеархитектурным элементам в целевом проектировании корабля.

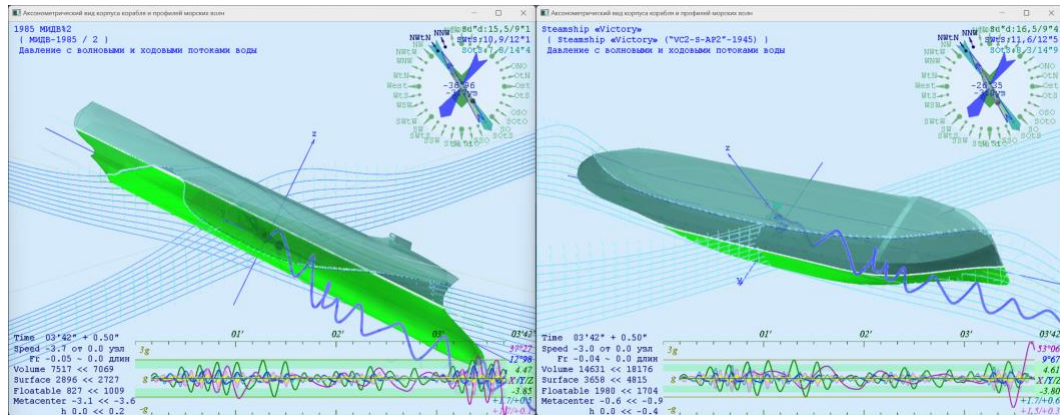


Рис. 26. Синхронные испытания МИДВ-85 и «Victory» без хода на трёх групповых структурах волн: $\lambda = \{ 1,0, 1,75 \text{ и } 2,5 \} \cdot L$ – относительно длины корпуса, с высотами $h = \{ 1,0, 0,4 \text{ и } 0,2 \}$ – от максимума трохоида гребня, что составляет $\zeta = \{ 16,6, 11,6 \text{ и } 8,3 \}$ м по высоте, соответственно. Курс навстречу первой системе волн зыби, свежая волна бьёт по правой скуле. Бортонная качка модели МИДВ в пределах $37^\circ 2'$ левого борта, для «Victory» это $53^\circ 1'$ на правый борт, и через 16" секунд судно опрокинется через левый борт.

Об адекватных морских инженерных изысканиях, в таком случае, можно говорить лишь по результатам систематических и многократных испытаний, что позволительно лишь в случае новых и прямых вычислительных экспериментов (Рис. 26). Соответственно, 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 выверка математических моделей и методов моделирования, когда обоснованность проектных решений становится понятной как для корабельных инженеров, так и для специалистов в области морского дела с реальной практикой штормового плавания.

Главным достоинством прямого вычислительного эксперимента представляется возможность контроля любой частицы жидкости в окружении корпуса корабля и каждого отдельного элемента судовой обшивки и взволнованной поверхности моря. В частности, на рисунках выше приводится информация по геометрии, кинематике и остойчивости судна; о воздействующем на него волнении с графиками углов качки и ускорений в оконечностях корпуса. В протоколах эксперимента фиксируется исходное состояние корабля и морского волнения, с последующими ежесекундными записями необходимых для оценок

мореходности динамических параметров. Полный состав данных в файле текстового протокола «ShipName.vil» представлен в документации по вычислительному эксперименту в программном комплексе «Aurora». По необходимости этот протокол может перестраиваться и расширяться любой дополнительной информацией по штормовым мореходным качествам корабля.

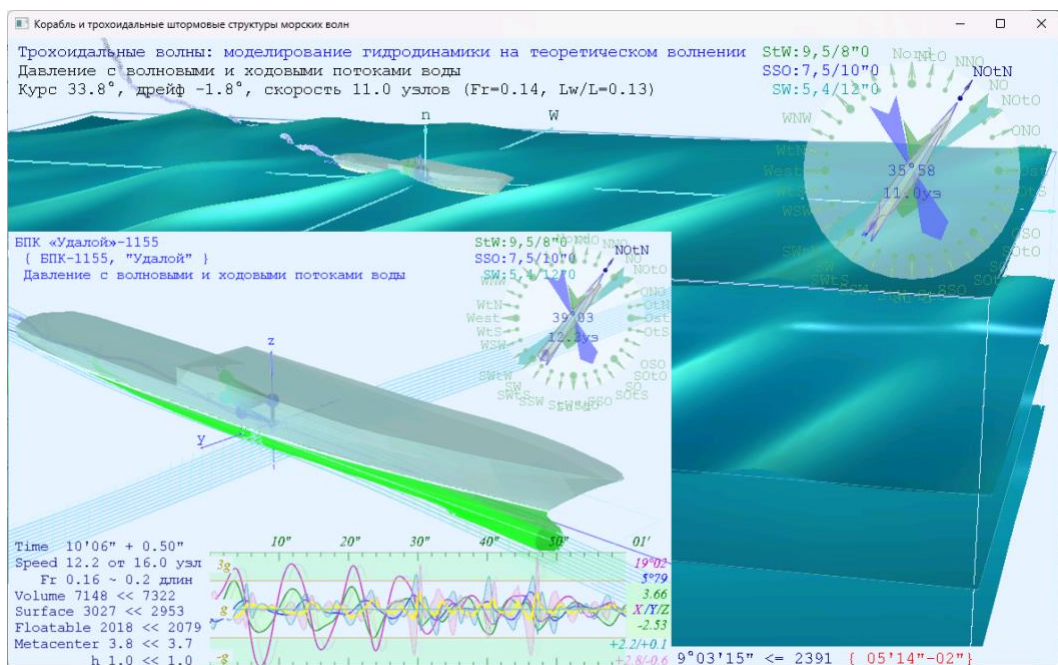


Рис. 27. В ходе вычислительного эксперимента задействуются два графических окна для представления морского волнения и корпуса корабля с метацентрическими отметками и графиками его динамики на ходу на волнении. На графиках ускорений в оконечностях, внизу слева, по шкале времени на 30" и 47" секундах фиксируется отрицательное ускорение свободного падения $-0,6 \cdot g$ – невесомость для всех палубных грузов, за которым следует удар под широкий кормовой транцевый подзор, с регистрацией перегрузки до $2,8 \cdot g$.

Управление ходом «цифровой» модели корабля выполняется с помощью условной тяги двигателя, которая предустанавливается как бы по заданной ходкости на тихой воде. Соответственно, в условиях волнения скорость хода может изменяться вплоть до обратной, и судно также может разгоняться – свободно дельфинировать по склону попутной волны.

Управление курсом ведётся с помощью аналога бортового авторулевого, где заданное направление движения регулируется фиксированной скоростью циркуляции, что по аналогии с действием кормового руля может определяться

как: «**по малу право / лево**»; «**руль право / лево**» и «**право / лево на борт**». Внешнее влияние волн может превышать управляющее воздействие «руля» с приведённой скоростью циркуляции, что снимает ограничения по возможности свободного рыскания на курсе в штормовом плавании, с плавным автоматическим приведением модели к заданному курсу, если последнее возможно в условиях заданного штормового волнения.

На циркуляции и рыскании на курсе моделируется возникновение крена, проявляются и другие эффекты качки и ходкости по всем шести степеням свободного маневрирующего корабля.

В движении корабля наблюдается естественный ходовой гидродинамический дифферент, вплоть до корректного моделирования выхода и поддержания ходкости в режиме глиссирования, так же как и в случае с положительным ходовым дифферентом на нос и заглоблениям корпуса со специально проработанными для этого обводами. Хорошо отмечается также дифферент при разгоне и торможении корабля, в том числе с проявлениями потерь хода на штормовом волнении; либо с ускорением и разгоном – дельфинированием на волне попутной.

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 корабля выполняется на любом 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 трохoidalного 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 всех видов 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 качки¹⁵, подверженных прямому воздействию быстрых потоков воды в трохоидах под штормовыми волнами.

¹⁵ В волнах малой высоты с синусоидальными профилями возможно высокочастотное демпфирование качки за счёт образования срывов поперечных потоков на бортовых килях, однако сопутствующие потери хода не менее значимы умерения слабой качки.

В штормовом море, как наяву видится динамичное зрелище, когда средний рыболовный траулер у борта производственного рефрижератора, при бортовой качке регулярно поднимает над водой бортовые кили, угрожая коснуться ими нашего фальшборта и прочного палубного ширстрека... Насколько же эффективны бортовые и днищевые кили в усилении или ослаблении интенсивной бортовой, килевой и вертикальной качки.

В ранее показанном патенте № 2360827 от 2007 года «Корабль без бортовой качки на волнении» [Л] показаны варианты сбалансированной гидромеханики бортовых килей (Рис. 8) в случае хорошо отработанных для этого корабельных обводов крейсера «Аврора», в отличие от условно современного крейсера «Варяг» (проект.58), для которого все 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 отсчет 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. 8) 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 «Аутога» 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 сил¹⁶. 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.

¹⁶ Здесь использован коэффициент $k_v = 0$ – обнуление отрицательного давления в потоке притяжения строго по нормали к элементарной расчетной площадке.

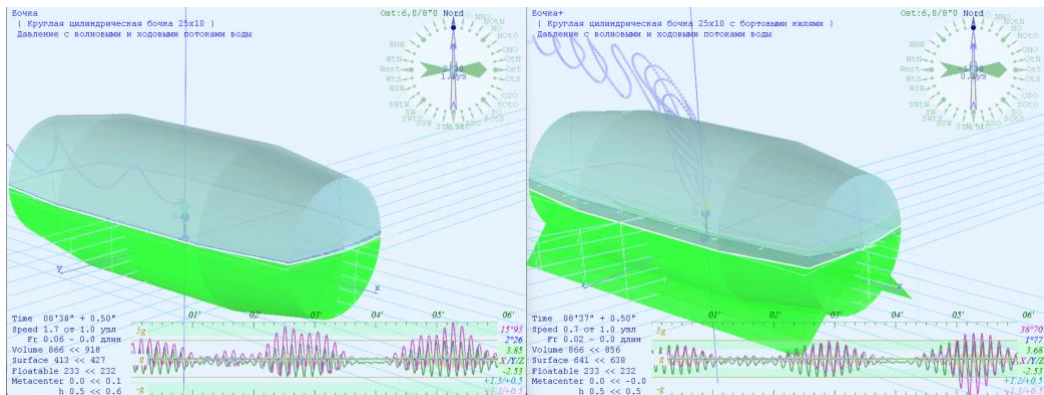


Рис. 28. Слева круглая цилиндрическая бочка на волне, справа она же, но с бортовыми наклонными килем. Длина волны $\lambda = 100$ м, высота $\zeta = 6$ м, ширина бочки $B = 10$ м, метацентрическая высота $h = 0,5$ м. Чистый корпус обретае размах качки до 16° . Тот же корпус с бортовыми килем усиливает размах крена при бортовой качке до 39° .

На рисунке выше синхронные вычислительные эксперименты с удлиненными бочками на трохoidalном 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 килем топчется на месте со значительным дрейфом в сторону правого борта.

Капитанская формула для метацентрической высоты $h=0,5$ м 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.

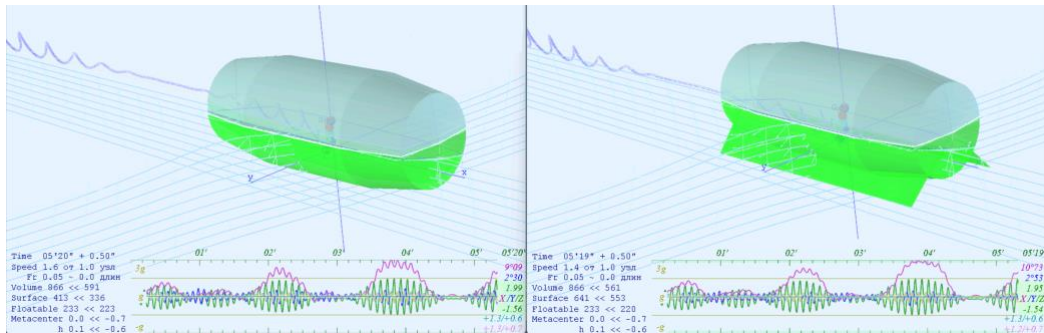


Рис. 29. Аналогичный синхронный эксперимент при длине волны $\lambda = 50$ м с высотой $\zeta = 3$ м, при этом метацентрическая высота водоизмещающего корпуса уменьшена до 1% ширины, и составляет 10 см. Период качки теперь огибает пульсации штормовых волн, при этом крен от поступательного дрейфа у чистого корпуса в целом меньше, хотя высокочастотные пульсации под ударами гребней волн чуть больше.

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 килями увеличивается с 9° до $10^\circ 73$, что на 15% больше чем у чистого бочонка без выступающих частей.

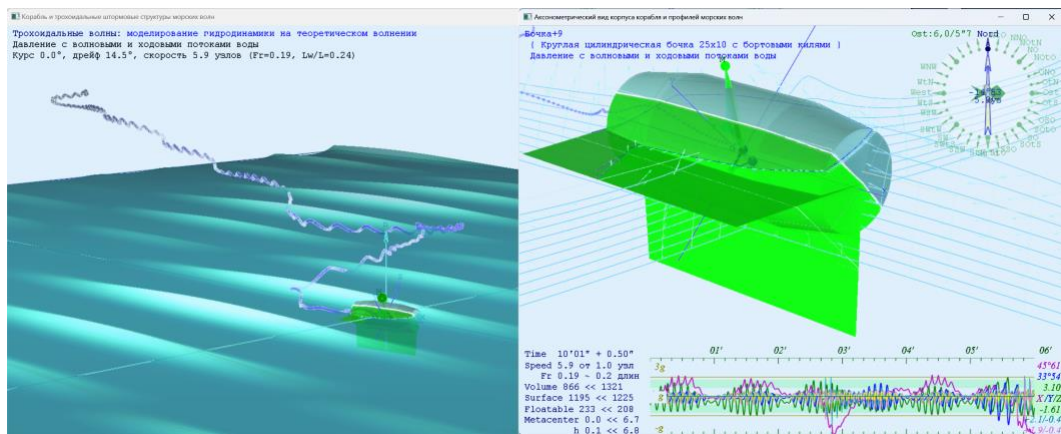


Рис. 30. Вариант опытов с бортовыми киллями значительно большей площади.

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 килями. 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 брочинг, дельфинирует или получает сокрушительные гидродинамические удары по выбрасываемым из воды бортовым киллям. Можно также 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 теперь в ходе вычислительного эксперимента не наблюдается ускорений в оконечностях более чем 0,5 g.

Индийском океане, это порядка 0,8 метров, с собственными периодами бортовой качки порядка 15 секунд.

Несмотря на большую в 23 тонны (+0,34%) массу корпуса корабля с рулём и объёмными килями, в результатах опытовых испытаний отмечаются неблагоприятные эффекты. Экстремальные углы бортовой качки возрастают с 30° до 36° по правому борту, что составляет превышение по максимальному крену 18%. На корпусе с выступающими частями наблюдается больший размах качки, так как без килей по левому борту максимальный крен по левому борту не превышает 24° .

Для большего различия результатов опытовых испытаний усиливалась асимметрия действия источников и стоков в условиях непротекания на бортовой обшивке, устанавливался коэффициент $k_v = 0$ для ослабления отрицательных давлений по нормальным компонентам набегающих скоростей. По умолчанию же в программном комплексе «Аугога» используется коэффициент $k_v = 0,5$, что в вышеописанных опытах снижает отличие максимальных углов крена для крейсера «Аврора» до одного процента ($\Delta < 1\%$). При этом тенденция к различию параметров мореходности, форма графиков качки и асимметрия углов крена на увеличение размаха бортовой качки с килями и без килей в полной мере повторяются.

То есть, предположение о корректности проведения оптимизационных опытов по форме корпуса корабля без учета бортовых – демпфирующих¹⁷ 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 должны заметно сказываться на параметрах его мореходности. На практике это же означает, что корпус крейсера вполне может воспринимать относительно слабые управляющие воздействия, например, при установке активных успокоителей бортовой качки не особо большой громоздкости.

¹⁷ Взаимокompенсация давлений относительно нормалей к набегающим потокам вблизи подводных крыльев и на кавитирующих реданах регулируется коэффициентом $k_v \in [0 \div 1]$

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.

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: $Fn \approx 0,22_{\min}, 0,24^{\max}, 0,26_{\min}, 0,3^{\max}, 0,33_{\min}, 0,48^{\max}$ 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 трохоидальных 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	$L_{\text{КВЛ}+\text{макс}}/B_{\text{КВЛ}+\text{макс}}/T_{\text{макс}}$	$W/S/\delta$	$\Delta h - \varrho^\circ$
Крейсер «Аврора»	124 ₊₃ / 16,8 / 6,4	6758,2 / 2355 / 0,508	0,46+61°
Корвет А-1201	88,6 _{+1,4} / 9 ₊₁ / 4 ₊₁	1863,3 / 1004,8 / 0,584	0,33+59°
МИДВ-1985(%2)	116 ₊₁₄ / 10,7 _{+5,3} / 8	7520,8 / 2786,5 / 0,756	1,41~rad
Steamship «Victory»	135,3 _{+3,4} / 18,9 / 8,53	14627 / 2750,3 / 0,672	0,31+43°
Лидер «Ташкент»	134 ₊₆ / 13,7 _{-0,6} / 3,98	2957,4 / 1630 / 0,422	0,03+35°
Крейсер «Варяг»-58	134 ₊₉ / 15,2 _{+0,9} / 4,5	4460,3 / 2081,4 / 0,487	-0,76~rad
«Стерегущий» – 61	133 ₊₁₁ / 14 _{+1,8} / 4,47	4319,6 / 2047,4 / 0,515	0,2+31°
«Буревестник»-1135	113 ₊₁₀ / 13,2 ₊₁ / 4,2 _{+2,68}	2915,1 / 1609,7 / 0,487	-0,34~rad
5415 US Navy	142 ₊₁₁ / 19,1 _{+1,4} / 6,15 _{+3,02}	8418 / 2975,6 / 0,507	-1,00~rad
ONR-5613 (DDX)	154 ₊₂ / 18,8 / 5,49 _{+2,1}	8524,4 / 3197,4 / 0,536	-0,88~rad

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	[М ³]
S – площадь смоченной обшивки	[М ²]
δ – коэффициент общей полноты	[δ]
Δh – максимум по S-образной диаграмме по углу крена, или – отсчёт плеча остойчивости по углу крена в 1 ~ рад (h)	[М]

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

Все мореходные вычислительные эксперименты проводятся на нерегулярном волнении с размерением $\lambda_w = L$ [М] относительно длины корпуса корабля для наиболее крутых или свежих ветровых волн. Волны зыби по длине $\lambda = 1,75 \cdot L$ [М] и высоте 0,4 от ветровых волн, и реликтовые валы длиннопериодной зыби по длине $\lambda = 2,5 \cdot L$ [М] 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 кораблей и судов первые опыты выполняются с нулевой метацентрической высотой, что крайне важно для оценок качества

проектирования обводов и формы корпуса корабля в целом. В отличие от тихой воды, в условиях морского волнения обретается некий полезный запас устойчивости, 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.

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

Список рисунков

- Рис. 1.** Пассажирский лайнер «Любовь Орлова» без широкой транцевой кормы – обладает плавной качкой с прогнозируемой интенсивностью.....7
- Рис. 2.** 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 [М] – аппликата центра величины; $zM \equiv 5$ [М] – аппликата метацентра; V [м³] – грузовой размер; S [м²] – смоченная поверхность корпуса; Swl [м²] – площадь действующей ватерлинии; $xC = 0$, $xS = 0$ [М] – абсциссы центра величины и центра ватерлинии; r, R [М] – поперечный и продольный метацентрические радиусы; Jx, Jy [м⁴] – моменты инерции площади действующей ватерлинии относительно продольной и поперечной осей корпуса.8
- Рис. 3.** 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. 4.** 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 ($h=0$) при посадке по конструктивной ватерлинии №5. На диаграммах уменьшен до 40% диапазон расчётных осадок: №3÷4 – на всплытие, и №6÷7 ватерлиний – на погружение корпуса при вертикальной качке.11
- Рис. 5.** Вариант расчетов остойчивости формы корпуса для цилиндрического корпуса – слева; корпуса кубической полноты со «струйной системой» обтекания – в центре; клиперским скуловым гашением корабельных и внешних штормовых волн – справа. Диаграммы построены для фиксированного положения центра тяжести (Z_g); нулевой метацентрической высоты ($h = 0$); по осадкам: 2÷4 – на всплытие, и 6÷9 на погружение корпуса в условиях вертикальной качки.12
- Рис. 6.** 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 №5, зеленые по ватерлиниям №3÷4 – при всплытии, и синие №6÷7 – при погружении в динамическом процессе в условиях вертикальной качки.14
- Рис. 7.** Гиперболизованная относительно исторических обводов модель корабля с малыми моментами инерции площади действующей ватерлинии (МИДВ-1985), построенная и оснащенная телеметрическим оборудованием в 1985 году для сравнительных мореходных испытаний в опытовом бассейне кафедры теории корабля Ленинградского кораблестроительного института.19

Рис. 8.	Характер гидродинамического воздействия морского волнения на корпус корабля показывает различия в перераспределении кренящих гидродинамических пар сил и моментов: А) – перспективного, слева, и Б) – современного, справа кораблей. Кренящий момент от прямого воздействия волнового гребня на надводный борт А) компенсируется завалом борта, а длинная вдолькорпусная надстройка на верхней палубе и бортовые кили способствуют компенсации остаточного кренящего момента. В случае развала бортов Б) 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 пары силы действуют в сторону образования крена на подветренный борт.	20
Рис. 9.	1) – гидростатические характеристики модели корабля «Early-1987», построенного по результатам обобщения серии мореходных экспериментов в опытовом бассейне кафедры теории корабля Ленинградского кораблестроительного института в 1985 году.	25
Рис. 10.	2) – остойчивость формы и кривые элементов теоретического чертежа (КЭТЧ) торпедного катера типа «Г-5» проекта ЦАГИ 1928 года.	26
Рис. 11.	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 $h = 0$	28
Рис. 12.	Полнота корпуса 3-й степени. Предпоследний экстремум по $F_n \approx 0,32$, так же как и для меньших скоростей хода, проявляются усилением интенсивности килевой и бортовой качки под воздействием соизмеримых по длине штормовых волн.	34
Рис. 13.	Вычисление волнового сопротивления; интенсивности излучения и интерференции корабельных волн у корпуса опытовой модели из 1979-1980 гг. На верхнем фото показано зарождение и отрыв крупной расходящейся волны вблизи поверхности эквидистантных ватерлиний в носовой оконечности. Вследствие оголения горизонтального плавника на ахтерштевне, на большой скорости хода у модели проявляются проблемы с поперечной остойчивостью.	36
Рис. 14.	Обводы носовой скулы модели МИДВ-85 лишь отчасти учитывают необходимость плавного затягивания встречного набегающего под днище корпуса, отчего в расчетах проявляется экстремум на кривой волнового сопротивления на скорости $F_n = 0,3$. В эксперименте, верхнее фото, модель показывает образование крутой расходящейся корабельной волны, которая в противофазе вместо отрыва от борта начинает оголять днище корпуса за пределами носовой скулы.	37
Рис. 15.	Аналогичные оценки интенсивности корабельного волнообразования и волнового сопротивления для обновлённых в 1987 году обводов корпуса со скуловыми сужениями носовых и кормовых ветвей шпангоутов для плавного сопряжения набегающих потоков между бортовыми и днищевыми поверхностями.	38
Рис. 16.	Результаты расчётов интенсивности корабельного волнообразования и волнового сопротивления для крейсера I-ранга «Аврора».	40

- Рис. 17.** Лидер эсминцев «Ташкент» итальянской постройки – образец формирования V-образных клиперских скуловых обводов как в носовой, так и в кормовой оконечностях корабля.41
- Рис. 18.** Гидромеханика килевой качки интерпретируется с использованием исторического понятия волнообразующей – волновоспринимающей длины корпуса $L(\text{wave})$, за пределами которой на $L(\text{kwl})$ корпус подпадает под прямые удары прогрессивных трохойдальных волн, где скуловые обводы и относительно низкий надводный борт должны способствовать стабилизации качки43
- Рис. 19.** Крейсер «Киров» с эквидистантными ватерлиниями «струйной системы обтекания» по носовой скуле.44
- Рис. 20.** Сравнительные кривые коэффициентов остаточного сопротивления моделей.
1. Эталонная модель «Victory»; 2. Модель 60-й серии; 3. МИДВ, осадка: $T=135$ мм; 4. $T=125$ мм; 5. $\Delta T=40$ мм на корму; 6. - ход кормой вперед; $1\div 3$ – испытание в гравитационной системе; $4\div 6$ – под буксировочной тележкой.47
- Рис. 21.** Удельное остаточное сопротивление моделей. 1. «Victory»; 2. 60-й серии; 3. МИДВ, $T = 135$ мм; 4. МИДВ при оптимизированной посадке: $T=125$ мм; $\Delta T=20$ мм на корму. $1\div 3$ - испытание в гравитационной системе; 4 - на буксировочной тележке.49
- Рис. 22.** Сравнение величин потери хода на волнении модели с корпусом МИДВ (черные кривые) и модели быстроходного судна 60-й серии с $\delta=0.572$ (синие кривые).50
- Рис. 23.** Интенсивность килевой качки в зависимости от скорости хода в различных условиях встречного регулярного волнения с нормировкой на вертикальные ускорения частиц жидкости в гребне волны. По вертикальной шкале соотношение ускорения в оконечностях моделей в сравнении с вертикальными ускорениями в гребнях морских волн. Левый рисунок – модель МИДВ, правый – 60-й серии51
- Рис. 24.** Прорисовки цифровых моделей для трёх (из пяти) проектов кораблей и судов, разработанных в рамках контракта Главного управления кораблестроения России в 2001 году, и успешно прошедших полный цикл мореходных испытаний в опытовом бассейне Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Условные названия моделей: а) корвет-1021; б) буксир-1202; в) транспортное судно-1203.53
- Рис. 25.** Обобщенные результаты опытовых испытаний ходкости (слева) и килевой качки (справа) моделей судов, оптимизированных для штормового плавания. Как и ожидалось, ходовые качества моделей перспективных судов оказались несколько лучшими, чем у традиционного быстроходного судна 60-серии, но худшими в сравнении с гипотетическим судном МИДВ-85. В то же время все проекты новых судов подтвердили превосходные результаты по условиям обитаемости в штормовых условиях.54
- Рис. 26.** Синхронные испытания МИДВ-85 и «Victory» без хода на трёх групповых структурах волн: $\lambda = \{ 1,0, 1,75 \text{ и } 2,5 \} \cdot L$ – относительно длины корпуса, с высотами $h = \{ 1,0, 0,4 \text{ и } 0,2 \}$ – от максимума трохойдального гребня, что составляет $\zeta = \{ 16,6, 11,6 \text{ и } 8,3 \}$ м по высоте, соответственно. Курс навстречу первой системе волн зыби, свежая волна бьёт по правой скуле. Бортовая качка модели МИДВ в пределах $37^\circ 2'$ левого борта, для «Victory» это $53^\circ 1'$ на правый борт, и через 16" секунд судно опрокинется через левый борт.58

- 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 ходу на волнении. На графиках ускорений в оконечностях, внизу слева, по шкале времени на 30" и 47" секундах фиксируется отрицательное ускорение свободного падения $-0,6 \cdot g$ – невесомость для всех палубных грузов, за которым следует удар под широкий кормовой транцевый подзор, с регистрацией перегрузки до $2,8 \cdot g$ 59
- Рис. 28.** Слева круглая цилиндрическая бочка на волне, справа она же, но с бортовыми наклонными киями. Длина волны $\lambda = 100$ м, высота $\zeta = 6$ м, ширина бочки $B = 10$ м, метацентрическая высота $h = 0,5$ м. Чистый корпус обретает размах качки до 16° . Тот же корпус с бортовыми киями усиливает размах крена при бортовой качке до 39° 64
- Рис. 29.** Аналогичный синхронный эксперимент при длине волны $\lambda = 50$ м с высотой $\zeta = 3$ м, при этом метацентрическая высота водоизмещающего корпуса уменьшена до 1% ширины, и составляет 10 см. Период качки теперь огибает пульсации штормовых волн, при этом крен от поступательного дрейфа у чистого корпуса в целом меньше, хотя высокочастотные пульсации под ударами гребней волн чуть больше.65
- Рис. 30.** Вариант опытов с бортовыми киями значительно большей площади.65
- Рис. 31.** Синхронный вычислительный эксперимент с мореходными испытаниями крейсера «Аврора» с чистым корпусом – нижние графики; с днищевым и бортовыми киями, и кормовым рулём управления – верхние графики. Экспериментально не подтверждается положительных эффектов от днищевых и бортовых килей для безупречных обводов крейсера «Аврора», что ранее оговаривалось патентом 2007 года № 2360827 «Корабль без бортовой качки на волнении». *Возможно положительный эффект существует, но лишь в демпфировании слабых гармонических воздействий от совсем уж малых синусоидальных колебаний?*67

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,
вычислительные эксперименты и теория корабля: Vessel-naviga.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 .