

Штормовая мореходность корабля (вычислительный эксперимент) Vessel on Stormy Waves (computational experiment)

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

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

Рабочие записи, часть 4

Экспериментальные изыскания 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 предназначению; 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 трохоидальным волнением, которые включаются в модели гидромеханики силового воздействия на корпус свободно маневрирующего в штормовом море корабля.

Чисто кораблестроительное направление исследований посвящено вопросам проектирования обводов и формы корпуса всепогодного корабля, способного к эффективному исполнению задач по основному предназначению 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 волне ветра и волн.

Актуальность поисковых работ обусловливается 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 изыскания мореходности и вычислительные эксперименты с проработкой обводов корпуса корабля.....	1
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>	6
Геометрические особенности обводов корпуса и оценки запаса остойчивости корабля	14
Предварительные заключения по штормовой остойчивости и гидродинамике корабля.....	21
<i>Корабельное волнообразование – отражение штормовых волн от корпуса корабля.....</i>	32
Особенности корабельного волнообразования и влияние обводов на силовую реакцию под воздействием штормовых волн.....	33
«Аврора», «Ташкент», «Киров» – кильевая качка и ходкость на волнении	41
Опытные испытания и сравнительная апробация современных, гипотетических и эволюционных обводов корпуса корабля	47
Всепогодный океанский флот Главного управления кораблестроения России 2001 года	54
Постановка и проведение прямых вычислительных экспериментов с кораблём в штормовом море.....	58
<i>Особенности реализации штормовых опытных и вычислительных экспериментов</i>	62
<i>Бортовые кили и крылья активных успокоителей качки</i>	63
<i>Мореходные испытания кораблей перспективного и действующего флота</i>	72
Мореходные вычислительные эксперименты: «Аврора», Корвет-1201, «Буревестник» и «Углекаменск».....	76
Корвет-1201 – корабль гидрографической и патрульной службы.....	76
Крейсер I-ранга «Аврора» Тихого океана	81
«Углекаменск» - средний рыболовный траулер морозильный, кормового траления	86
Сторожевой корабль «Буревестник».....	90
<i>Штормовой ход вразрез волне</i>	94
Универсальное транспортное судно А-1203 (Univer-86).....	97
Крейсер I-ранга «Аврора» Тихого океана	102
Пассажирский лайнер «Азербайджан»	103
Буксир-спасатель – научно-исследовательское судно	103
<i>Список рисунков</i>	104

Синтез проектных предпосылок из анализа гидростатики, остойчивости 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 ограничивающих 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 прибрежья.

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:

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

**о наставлениях
мореплавателям**

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

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

При востребовании опыта хорошей морской практики [Поисковые..., 2018] 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 близ береговой длиннопериодной зыби.

В реальной морской практике совсем непросто формализовать опыт экстремального кораблевождения, что обуславливается 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 вкупе с вычищаемыми от «лишнего» записями. Частичному решению проблем адекватности экспедиционного опыта штормового маневрирования может служить задействование независимой телеметрии для контроля ходкости, качки и, возможно, прочности корпуса, с последующим анализом результатов столь дорогостоящих корабельных испытаний. Наблюдения в интересах отработки наставлений мореплавателям весьма полезны по первым выходам и в процессе всепогодной эксплуатации корабля, но всё же, такой послепроектный анализ мореходности располагает недоопределенной 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

к морской практике

к обоснованию вычислительного эксперимента

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 расчёто-информационной аппаратуры. Тогда, в оперативной обстановке, с использованием визуальных оценок состояния моря и показаний бортовой телеметрии, будут выполняться аналогичные проектным обоснования мореходных качеств, но уже для выработки конкретных навигационных решений:

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

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

о бедах дифференциальных
уравнений качки корабля

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

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

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

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

Запас остойчивости 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 ожидаться заметное ослабление бортовой качки корабля. Заметим здесь, что правило применимо для кораблей, изначально подготовленных к штормовому океанскому плаванию, и может привести к опасности опрокидывания кораблей с обводами более эстетического характера.

Рассмотрим вопросы обоснования означенных мореходных качеств корабля. Максимальная интенсивность бортовой качки ожидается в случае резонансно-

го совпадение 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 трохоидальных 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:

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

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

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



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

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

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

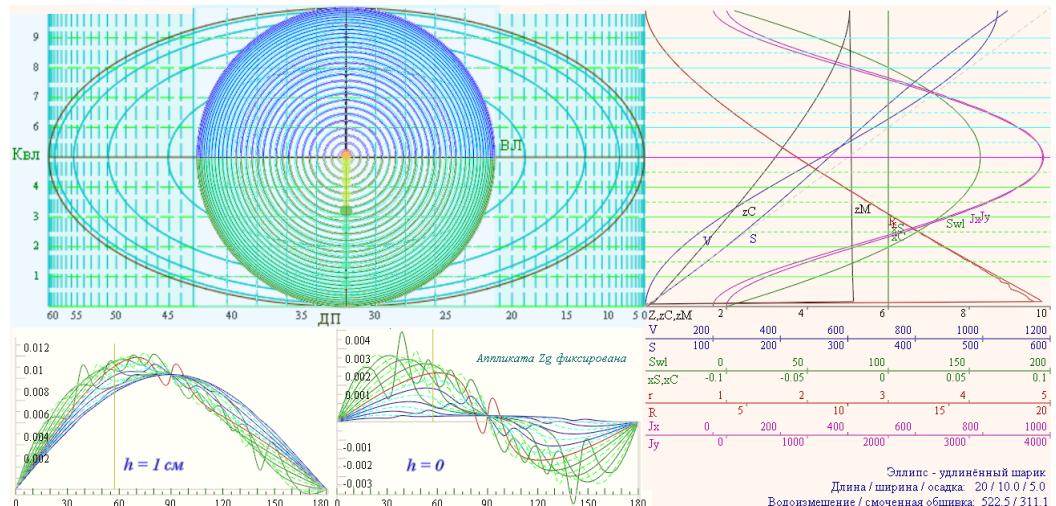


Рис. 2. Проекции бок и корпус теоретических контуров эллипсоида (сверху-слева); для диаграммы остойчивости (слева-внизу)¹ при фиксированном положении центра тяжести (Zg) и правее – при нулевой начальной метацентрической высоте ($h = 0$), и левее – при ($h = 1 \text{ см}$) одной тысячной от ширины корпуса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

¹ Пульсации графиков на диаграммах остойчивости 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 восстановливающих 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 считаются 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 накренится на 45° , выйдя в положение с диагональной шириной и максимальной площадью ватерлинии.

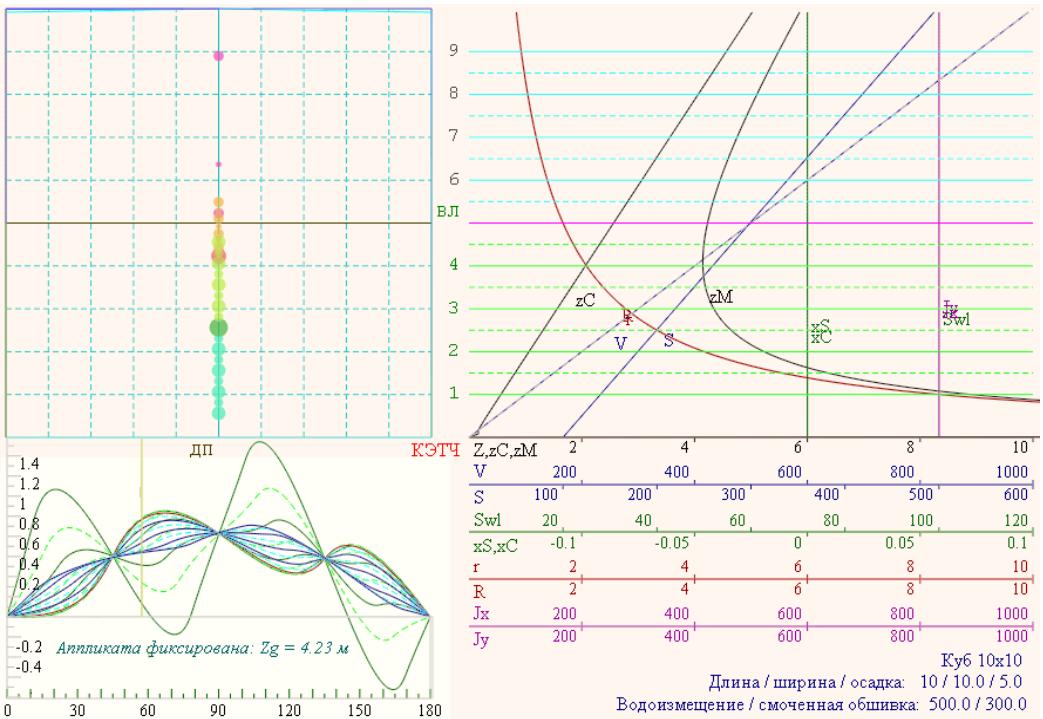


Рис. 3. Контуры корпуса куба (сверху-слева); и и его диаграммы остойчивости (слева-внизу) при фиксированном положении центра тяжести (Z_g) и нулевой начальной метацентрической высоте ($h=0$); справа гидростатические кривые элементов теоретического чертежа.

Важное замечание относительно влияния любого изменения осадки на обретение положительной величины метацентрической высоты, что как бы взаимо-компенсирует 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 ватерли-

нию 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. Спрямление 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.

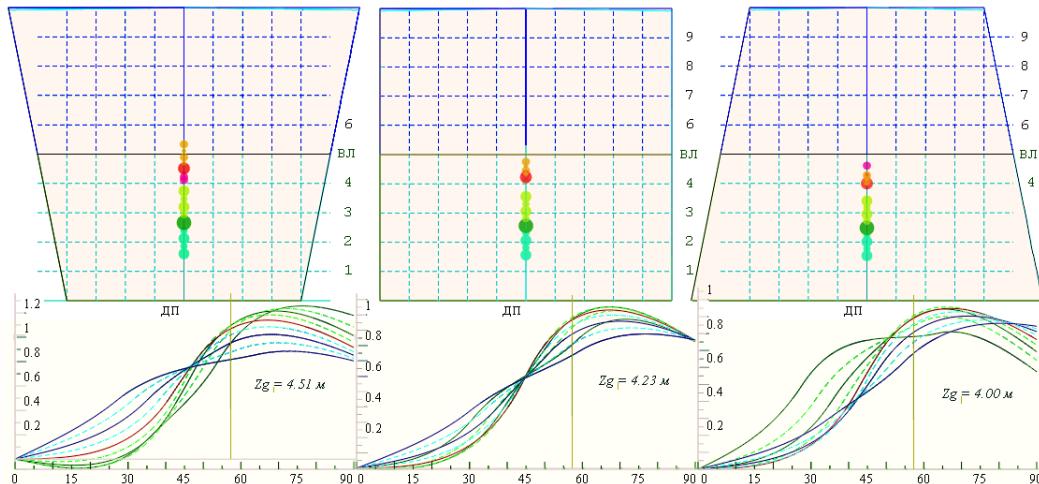


Рис. 4. Вариант расчетов остойчивости формы корпуса для развала борта – слева; вертикальных бортов – по центру; и завала бортов – справа. Диаграммы построены для фиксированного положения центра тяжести (Z_g) и нулевой начальной метацентрической высоты ($h=0$) при посадке по конструктивной ватерлинии №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, предпочтительнее уменьшить кривизну контуров на уровне действующей ватерлинии.

терлинии в оконечностях корпуса, для компенсации негативных эффектов целесообразно усиливать борта в средней части корпуса.

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

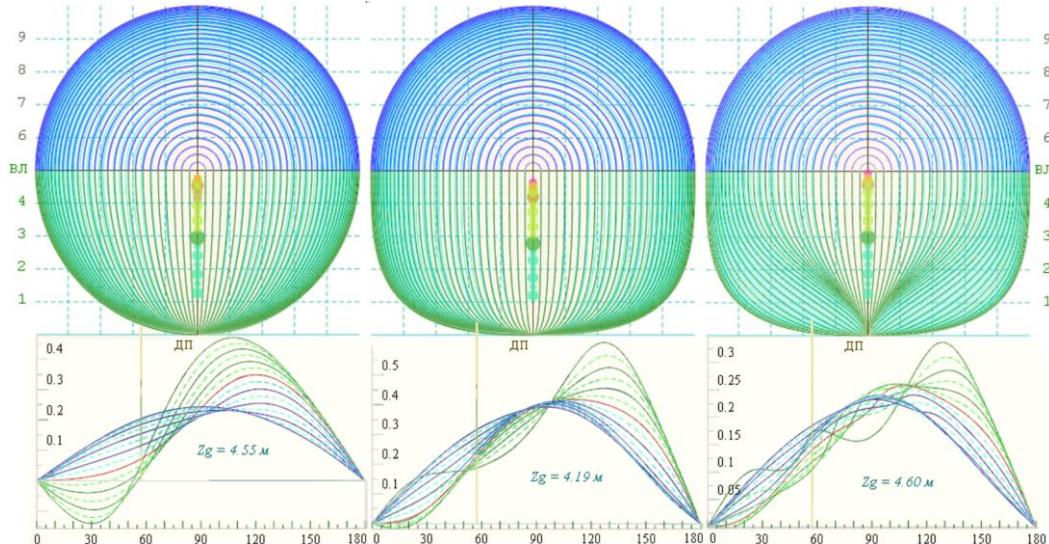


Рис. 5. Вариант расчетов остойчивости формы корпуса для цилиндрического корпуса – слева; корпуса кубической полноты со «струйной системой»² обтекания – в центре; клиперским скуловым гашением корабельных и внешних штормовых волн – справа. Диаграммы построены для фиксированного положения центра тяжести (Zg); 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 окружного 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 усилинию 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 сколовых обводов в оконечностях с заострёнными книзу V-образными или клиперскими сколовыми 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 окружных корабельных обводов обладают абсолютным запасом остойчивости на любых углах крена, с несущественными оговорками по переменным посадкам. Диаграммы остойчивости формы окружного корпуса ($h=0$) показывают принципиальную невозможность опрокидывания корабля с окружным 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.

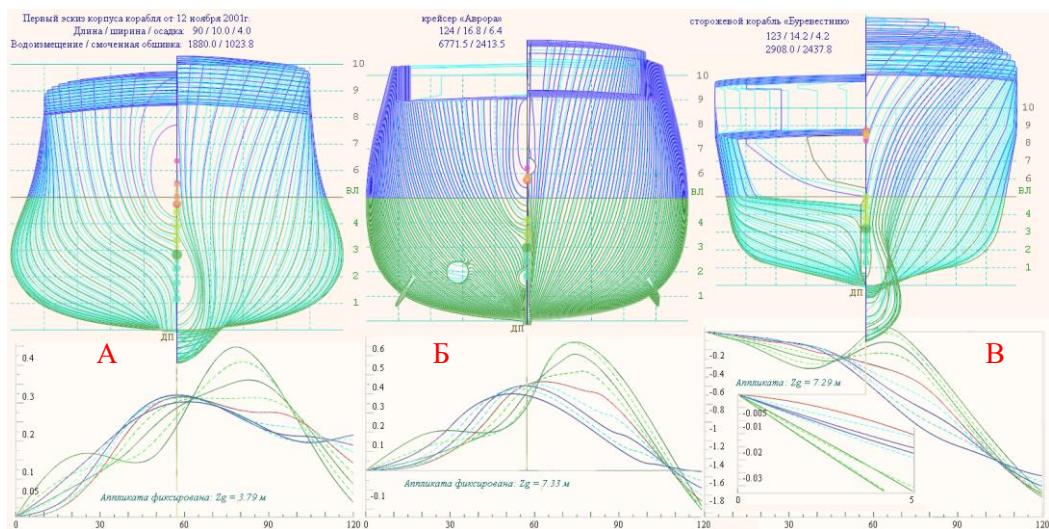


Рис. 6. Сверху изображены три варианта проекции корпус для теоретических чертежей с диаграммами остойчивости формы корпуса кораблей, ниже, для различных осадок при фиксированных положениях центра тяжести (Z_g) и нулевой начальной метацентрической высоте ($h=0$): А-«Корвет» – корабль повышенной штормовой 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 водерлиниям №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 кор-

пуса в целом. На теоретических чертежах корпуса и диаграммах Рида для трёх кораблей показываются особенности изменения остойчивости в походном состоянии с фиксированным положением аппликаты центра тяжести, соответствующей нулевой метацентрической высоте на рабочей осадке.

Площадь под диаграммами остойчивости становится характеристикой запаса остойчивости формы корпуса при динамически изменяющейся в штормовом плавании осадке, и, соответственно, спрятленный пучок диаграмм остойчивости в диапазоне углов штормовой качки должны восприниматься в качестве действующей меры восстанавливающих плеч и поперечных моментов, необходимых для использования в капитанской формуле при оценках периодов качки. Соответственно, при малом размахе бортовая качка очень плавная, при усилении шторма оценки остойчивости корабля по периодам собственных поперечных колебаний будут получаться всё более обнадёживающими.

В океанских походах крейсер «Аврора» нагружался под типовую эксплуатационную величину метацентрической высоты, судя по историческим источникам³, она составляла примерно $h \approx 80$ см, и периодом бортовой качки порядка $\tau \approx 17$ секунд, с максимальным восстанавливающим плечом $l = 1,08$ м под углом крена $\vartheta = 72^\circ$, и в таком случае вовсе без угла заката диаграммы, что условно назовём абсолютной остойчивостью. Период штормовых волн в $\tau \approx 17$ секунд не характерен даже для океанских акваторий, разве что для длиннопериодной зыби с пологими склонами, приходящей из удаленных акваторий с ураганными ветрами.

Перед командиром корабля не стояло проблем выбора курса и скорости хода в условиях штормового волнения любой интенсивности. Поддержание в полной готовности к задействованию по назначению всех бортовых устройств, механизмов и вооружений поддерживалось всегда. Крейсер позволяет временно выбирать режим хода относительно штормовой волны для условно комфортного обитания на борту «Авроры», например в обеденные часы и др.

Для «Буревестника» метацентрическая высота должна поддерживаться на уровнях не менее 1,5 – 2,5 метров, что соответствует бортовой качке от 10,5 до 8 секунд, с 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 В-«Буревестника» заметно снижает максимальные плечи остойчивости, тогда как S-образная вогнутость диаграмм для крейсера «Аврора» обеспечивает необходимую остойчивость на больших углах крена.

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

Свойственные В-«Буревестнику» факторы недостаточной мореходности будут проявляться 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 всяко не лучше чем у «Авроры» без оного «рычага»? Точка перегиба с небольшим завалом борта на уровне действующей ватерлинии способствуют положительной остойчивости корабля даже при нулевой начальной метацентрической высоте, как условие плавной апериодической качки. Отличительной особенностью остойчивости перспективного корабля А-«Корвет» отмечается быстрое восстановление положительной величины метацентрической высоты и действующих плеч остойчивости при любых изменениях осадки, 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 прорицанием или особой морской грамотностью старшего кораблестроителя крейсера Саверия 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.

Корабль «Буревестник» не обладает S-образными диаграммами и каким-либо запасом остойчивости на тихой воде, так же как и на волнении. При снижении до нуля метацентрической высоты корабль рискует незамедлительно опрокинуться кверху килем без каких-либо видимых предупреждений, которые можно было бы отметить в наставлениях мореплавателям.

Можно предполагать, что подтверждается в опытных экспериментах с Корветом на интенсивном волнении, что крейсеру «Аврора» столь же позволительно и безопасно гасить реакцию на силовые воздействия штормовых волн с помощью увеличения собственных периодов бортовой качки корабля, путём уменьшения или обнуления метацентрической высоты. Возникновение отрица-

тельной остойчивости формы корпуса при S-образных диаграммах будет обнаруживаться постоянным или длительным накренением попеременно на один или другой борт 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.

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 отклонении от курса на 1÷2 румба (15÷20°) возникают мощные и опасные удары сколового слеминга.

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.

Положительный по остойчивости геометрический эффект формы корпуса может быть значительно усилен как по углам крена, так и по любым изменениям посадки в моменты вертикальной качки на волнении.

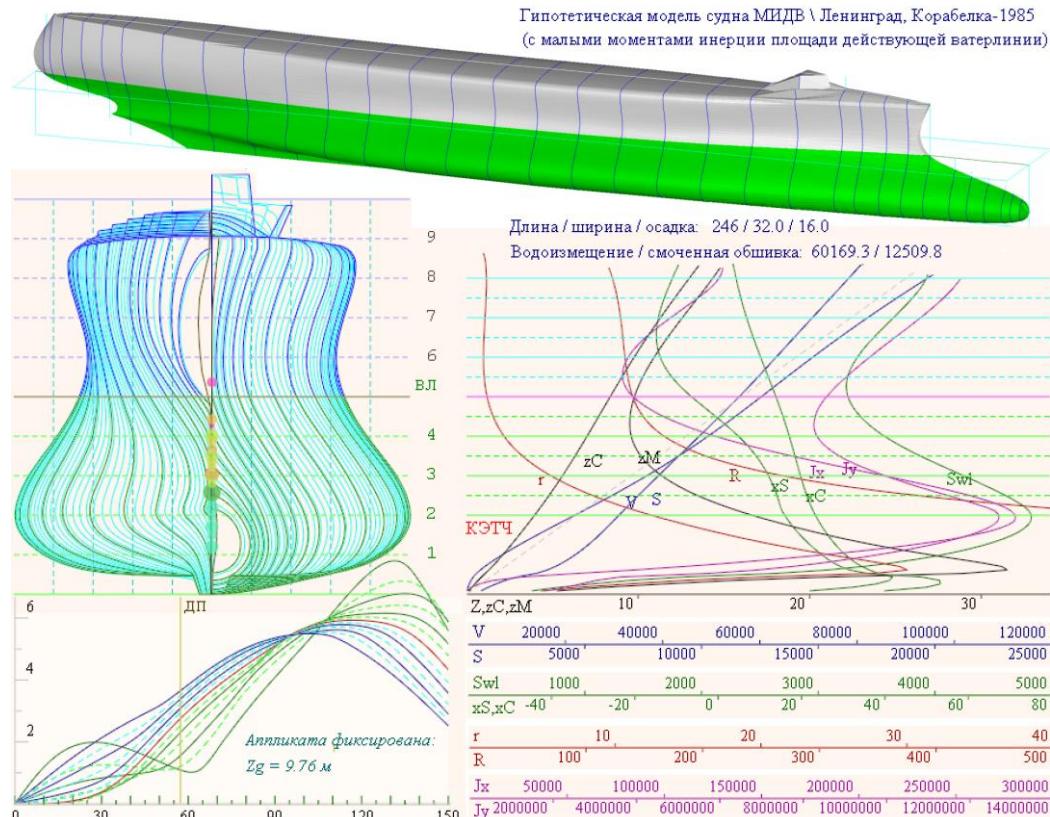


Рис. 7. Гиперболизованная относительно традиционных обводов модель корабля с малыми моментами инерции площади действующей ватерлинии (МИДВ-85), построенная и оснащенная телеметрическим оборудованием в 1985 году для сравнительных мореходных испытаний в гравитационной буксирующей системе на регулярном волнении в опытном бассейне кафедры теории корабля Ленинградского кораблестроительного института.

Первые оценочные опыты с малыми моделями судов выполнялись в морских походах из Калининграда, Севастополя и Владивостока, затем при неболь-

шой доработке в Ленинграде отрабатывались варианты обводов корпуса корабля по прототипам геометрии тел рыб, обитающих вблизи поверхности моря и адаптированных к особенностям гидромеханики стабильного движения вблизи свободной поверхности, это акула, рыба парусник и др.

По результатам создана гипотетическая модель корабля с малыми моментами инерции площади действующей ватерлинии и смешенным к носу центром величины погруженного в воду корпуса МИДВ-85 (Рис. 7). Именно эта модель впервые ярко показала особенности корпуса с огромным запасом остойчивости, обеспечиваемым как при больших углах крена, так и при любом изменении посадки корабля в условиях интенсивной вертикальной качки на волнении. Получалось так, что в геометрической интерпретации модель МИДВ-85 экстраполировала особенности формы корпуса крейсера «Аврора» в противопоставление современным эстетическим взглядам о красивом корабле типа «Буревестник», появление которого в составе ВМФ СССР отзывалось некоторым недоумением у морских офицеров старой школы, познававших корабельные науки и морскую практику от авторитетных доцентов кафедр наставников.

Модель МИДВ-85 участвовала в штормовых мореходных испытаниях в гравитационной буксировочной системе на регулярном волнении опытного бассейна кафедры теории корабля Ленинградского кораблестроительного института. Совместно и в том же измерительном окружении проводились сравнительные испытания с моделью корпуса 60-серии, и с эталонной моделью судна «Victory». На крупной волне модель быстроходного судна 60-серии попадала в аварийные ситуации при параметрическом резонансе на малых ходах навстречу волне (ниже это показывается в прямых вычислительных экспериментах). В то же время, по общему впечатлению от мореходности модели МИДВ-85, чем меньше остойчивость и чем крупнее волна, тем естественнее и спокойнее и увереннее ведет себя модель на интенсивном волнении, не проявляя ни усиленной бортовой качки, ни заливаемости заниженных верхних палуб.

С использованием результатов широкой серии испытаний, с учетом визуальных наблюдений за штормовым маневрированием моделей, отрабатывались обновленные проектные решения и концептуальные прорисовки улучшенных обводов и формы корпуса корабля в целом. Проект улучшенных обводов и общекорабельной архитектуры повышенной штормовой мореходности (Рис. 8) в варианте

универсального транспортного судна (Univer-86⁵) создавался в 1986 году, непосредственно при анализе огрехов и поисковом синтезе новой концепции целевого проектирования всепогодного судна.

Ключевым элементом стало требование по достижению достаточного запаса штормовой остойчивости при нулевой метацентрической высоте с предельно плавной бортовой качкой; с попутным снижением корабельного волнообразования на промежуточных скоростях хода $F_n \approx 0,3 \div 0,4$ в зоне последнего минимума на кривых волнового сопротивления, где по гипотезе возвратных волновых реакций ожидается снижение силового воздействия на корпус от соразмерных штормовых волн.

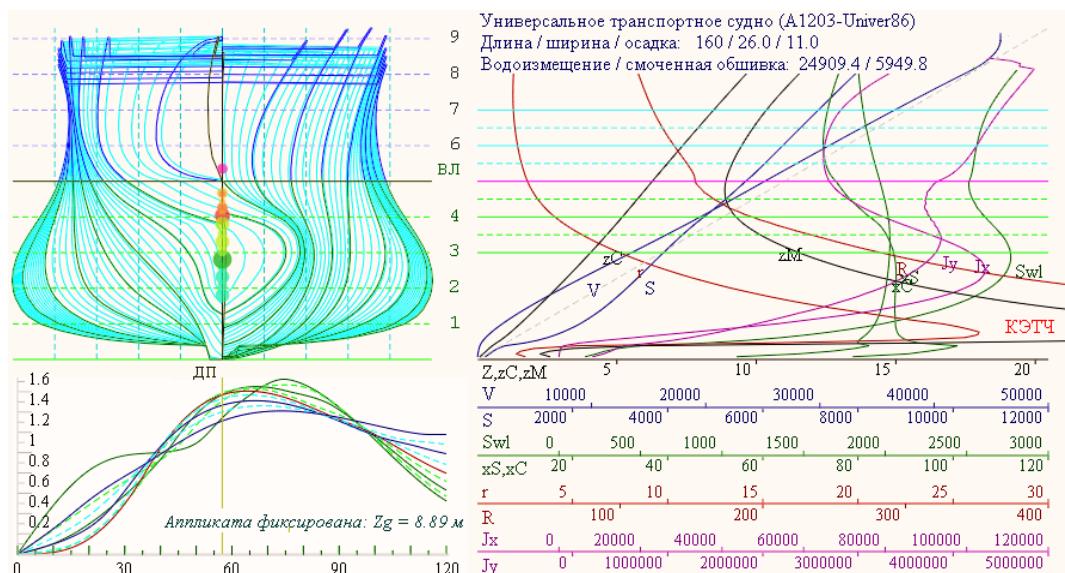


Рис. 8. Вариант расчёта гидростатических кривых и диаграмм остойчивости гипотетического транспортного судна. При нулевой начальной остойчивости на конструктивной осадке внешние кренящие моменты малы практически до 25° волнового склона. Диаграммы остойчивости показывают заметный рост метацентрической высоты при любом изменении посадки в условиях интенсивной вертикальной качки.

В предварительных заключениях попробуем вкратце проанализировать наметившиеся концептуальные предпосылки к проектированию обводов корпуса в свете предопределения мореходных качеств корабля с помощью особого по-

⁵ «Универсальное транспортное судно» (Univer86). Храмушин В. Н. Патент № 2603709 (СахГУ). Рег.№ 2015126838/11(041761), от 2015-07-03. (составлено 2015-03-26, решение о выдаче патента 2016-07-04) ShipDesign.ru/Invent/10.html

строения обводов, надводного борта и активных успокоителей качки в быстром потоке за гребными винтами под крейсерским кормовым подзором (*не 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 опытные 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 опытного 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 воздействования современной вычислительной техники исторически строились на основе опытных 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 винто-рулевым 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 узостей, 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 конст-

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

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 движителей и успокоителей качки для компенсации оптимизационных потерь.

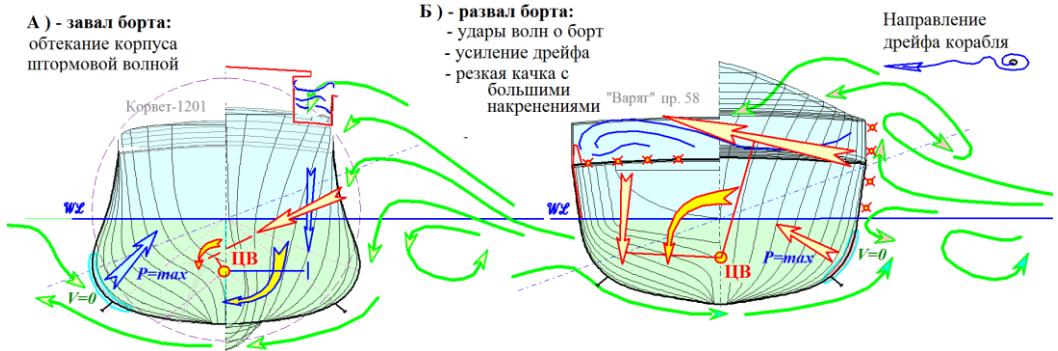


Рис. 9. Характер гидродинамического воздействия морского волнения на корпус корабля показывает различия в перераспределении кренящих гидродинамических пар сил и моментов: А) – перспективного, слева, и Б) – современного, справа кораблей. Кренящий момент от прямого воздействия волнового гребня на надводный борт А) компенсируется завалом борта, а длинная вдолькорпусная надстройка на верхней палубе и бортовые кили способствуют компенсации остаточного кренящего момента. В случае разрыва 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.

По мере рассмотрения результатов вычислительных экспериментов уместно возвращаться к ранее патентованным проектным решениям, создающим техническую основу в постановках задач по достижению требуемых мореходных качеств корабля. Такие заявки на изобретения с решением различных вопросов в области всепогодного мореходства последовательно представлялись в Роспатент, как по степени их важности, так и по мере необходимости детальных обоснований

или уточнения геометрии корабельных обводов в сочетании с общеархитектурными особенностями различных классов кораблей и гражданских судов.

Патент 2007 года № 2360827 «Корабль без бортовой качки на волнении»⁶ определяет особенности формы корпуса корабля, способствующие взаимокомпенсации всех внешних сил волновой природы при их одновременном и всестороннем воздействии на корпус и палубы корабля. Целевое непротиворечивое проектирование корабля (Рис. 9, А) – всестороннее согласование гидростатики и гидромеханики штормового хода корабля с минимальным или скомпенсированным внешним силовым воздействием. В случае (Рис. 9, Б) – все внешние силы действуют на усиление опасности, а необходимость «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 телевизуемых моделей судов с проектными предпосылками о достижении наилучшей штормовой мореходности обоснованы и представлены к практической реализации в документации по патенту России⁷: «Корабль, остойчивый в штормовом плавании».

Современный корабль (Рис. 9, 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, усиливающими образованием сильного бокового дрейфа, превращающего бортовые и днищевые кили в паразитные выступающие части.

Корпус корабля с завалом борта (Рис. 9, А) подтормаживает штормовую волну на уровне подошвы, создавая гидродинамические условия для затягивания трохоидального вихря под днище корабля, одновременно перенаправляя вниз ве-

⁶ «Корабль без бортовой качки на волнении». Патент № 2360827 от 2009.07.10. Бюл. № 19. Рег.№ 2007133623, от 2007.09.07., вх.№ 036720. ShipDesign.ru/Invent/01.html

⁷ «Корабль, остойчивый в штормовом плавании». Храмушкин 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

тор 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 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. 9, 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 усилинию 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 востреивается для контроля остойчивости корабля по факту обнаружения затянувшихся по времени накренений. 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 штурмового волнения и ветра.

В случае раз渲а 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 $1,5\div2,5$ метра. При характерных корабельных размерениях периоды собственных колебаний такого корпуса будут резонировать со свойственными для морских и прибрежных акваторий периодами штормовых волн порядка $6\div10$ секунд. Учитывая, что наличие развесистого развода 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 опытной модели начинает хорошо проявляться динамика вертикальной качки, собственные периоды которой эмпирически оцениваются аналогами капитанской формулы как $\tau_\zeta \approx 2,5\cdot\sqrt{T}$ [сек], где T [м] – осадка, и эти периоды соразмерны килевой качке $\tau_\psi \approx 2,4\cdot\sqrt{T}$ [сек], что обычно 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 остойчивости 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, остойчивый в штормовом плавании»⁸, где систематизированы вышеупомянутые заключения о наилучшем варианте формы мидельшпангоута с точкой перегиба и небольшим завалом борта на уровне конструктивной (действующей) ватерлинии, с упоминанием предпочтительном устройстве заострённой кормовой оконечности выше ватерлинии, или – в виде крейсерской кормы.

Экспериментально все технические решения многократно проверялись с различными малыми моделями судов в периоды работы на море в Калининграде, в Севастополе и во Владивостоке, где в основном отрабатывались технические

⁸ «Корабль, остойчивый в штормовом плавании». Патент № 2487043 (СахГУ). Бюл. № 2 от 2013.01.20. Рег. № 2011129192, от 2011.07.12. ShipDesign.ru/Invent/06.html

решения по ходкости, килевой и бортовой качке. Заключительным подтверждением возможности практически полного исключения бортовой качки⁹ в опытном бассейне Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Соответственно, в вышеуказанных патентах представлена и обоснована расширенная гидродинамическая трактовка остойчивости корабля на интенсивном морском волнении (Рис. 9), 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 опытных 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 волнобразованием;

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

Корпус корабля (Рис. 10) с шифром «Early-1987» строился в качестве обновлённой компромиссной модели по результатам сравнительных опытных экспериментов с моделью гиперболизированного корабля «МИДВ-1985», с лучшим согласованием оптимизационных недочетов проекта корпуса универсального транспортного судна Univer-86.

⁹ 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 штурмует без хода в моменты приведения на новый курс относительно регулярного волнения в опытном бассейне (совершенно неожиданное достижение полной компенсации бортовой качки для всех режимов плавания в условиях предельно крупного волнения). 21,5 Мб.

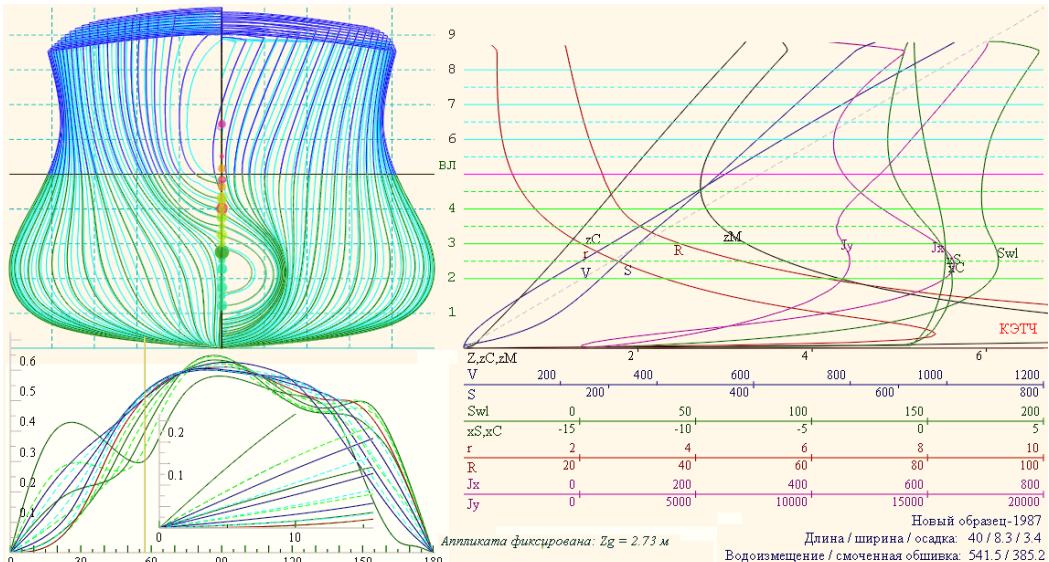


Рис. 10. Var.1) – гидростатические характеристики модели корабля «Early-1987», построенного по результатам обобщения серии мореходных экспериментов в опытном бассейне кафедры теории корабля Ленинградского кораблестроительного института в 1985 году.

Доработка проекта «Early-1987» проводилась с повышенными требованиями к снижению корабельного волнобразования на средних скоростях с числами Фруда порядка $F_n \approx 0,35 \div 0,45$, так как в ходовых испытаниях «МИДВ-1985» на указанных скоростях наблюдался чётко выраженный гребень расходящейся корабельной волны излишней высоты. С этой целью в окончностях 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 окончностях.

Задача ходкости и минимизации всех видов качки успешно достигнуты, о чём будет многократно упоминаться в следующих гидродинамических разделах работы. В согласии с концепцией непротиворечивого проектирования, обновленный корпус обретал прекрасными гидростатическими качествами и остойчивостью формы ($h = 0$) в широких диапазонах осадок и углов крена – углов склона набегающих штормовых волн.

На диаграммах остойчивости формы ($h = 0$) корпуса «Early-1987» ярко выражается минимальность восстановливающего 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. 10) 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.

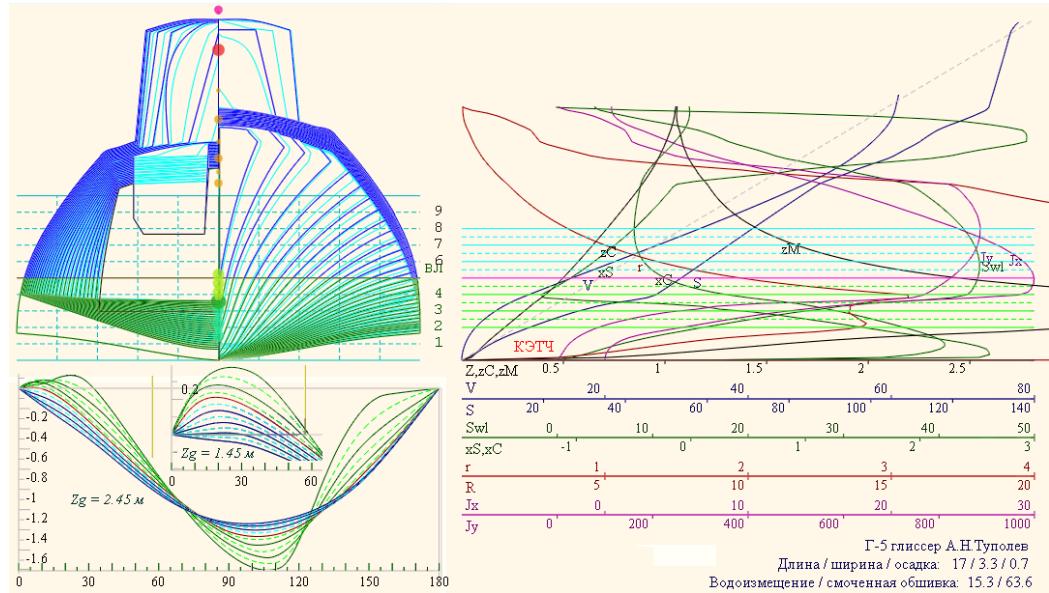


Рис. 11. Var.2) – остойчивость формы и кривые элементов теоретического чертежа (КЭТЧ) торпедного катера типа «Г-5» проекта ЦАГИ 1928 года.

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. 11) должна оцениваться из гидродинамических принципов. Катер Г-5 легко встает на редан и при циркуляции на огромных скоростях более 50 узлов ($F_n \approx 2$) 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 над диаграммами остойчивости формы (Рис. 11) приведен фрагмент для начальной метацентрической высоты $h = 1$ м. Тогда угол заката получится около $9^\circ_v \approx 50^\circ$, максимальное плечо восстанавливающего момента $l_{max} = 20$ см при крене порядка $9^\circ_m \approx 20^\circ$. При небольшой ширине корпуса $B = 3,3$ м метацентрическая высота $h = 1$ м считается относительно большой, однако столь неважные характеристики объясняются избыточной выпуклостью диаграмм остойчивости на рабочих осадках. Столь же ненадежная остойчивость свойственна 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 9°_f .

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 глиссирующего корпуса практическая остойчивость определяется гидродинамикой скольжения по поверхности воды, где положительные восстанавливающие моменты возникают под действием импульсов отражаемых обшивкой быстрых частиц жидкости, и даже в слабой волне отклонение движения этих частиц от поступательного набегающего потока будет проявляться скорее только высокочастотными или ударными нагрузками.

Неожиданно негативные оценки запаса остойчивости получаются в отношении экспериментальной модели «ONR-6513 Tumblehome ship» (Рис. 12), широко вовлеченной в отработку вопросов мореходности корабля на международных научных форумах¹⁰ 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.

¹⁰ 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/

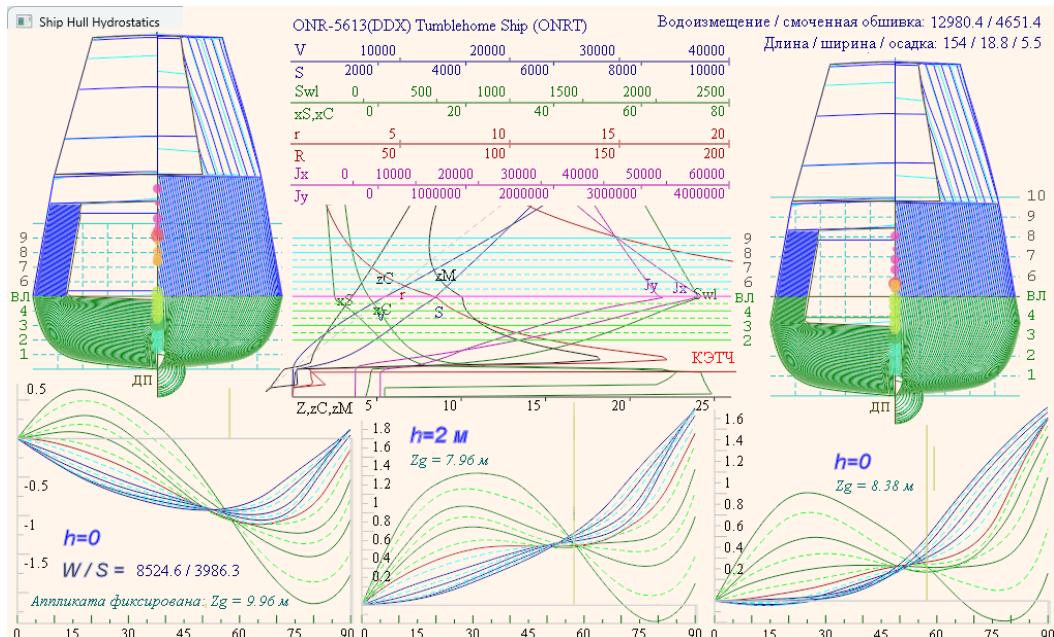


Рис. 12. Var.3) – гидростатические характеристики и диаграммы остойчивости предварительного проекта современного корабля «ONR-5613 Tumble-home ship». Левый чертеж корпуса по конструктивной осадке, ниже под ним диаграммы остойчивости формы корпуса $h = 0$, правее по центру те же диаграммы с фиксированием 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 $h = 0$.

На гидростатических кривых образуются острые сломы на J_x – поперечном и J_y – продольном моментах инерции площадей ватерлиний, 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 восстановливающего момента снижается до $L_{max} \approx 0,5 \text{ м}$, вчетверо меньше начальной метацентрической высоты $h = 2 \text{ м}$.

Вся кормовая часть корабля имеет одинаково плоское днище, без сколового 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 на-

блюдается, что лишь усугубляет негативные особенности корпуса по ударным нагрузкам – кормовому слемингу на ходу по волне, с опасными штормовыми захватами широкой кормы гребнями волн.

Если у оптимизируемых обводов корпуса завал борта сказывается на снижении максимального восстанавливающего момента, компенсируемого большим или абсолютным запасом остойчивости на больших углах крена. В случае модели «ONR-6513 Tumblehome ship» простой завал борта выше ватерлинии точно также снижает величину максимального момента остойчивости, но у него, подобно мелкосидящему с низким надводным бортом речному пароходу, срезается угол заката диаграммы остойчивости, что даже в случае безмерно высокой начальной метacentрической 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 общеархитектурных представлений по обличию кораблей и гражданских судов, что формально предполагает существование некоего диалектического процесса по вопросам хорошей морской практики, с дискуссиями об эстетических возвретиях 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 воспроизвело сопутствующее уменьшение ширины B [м] и поперечного момента инерции J_x [м⁴] площади действующей ватерлинии. В качестве исходной геометрической предпосылки уместно полагать, что аналогичная концепция по уменьшению продольного момента инерции площади действующей ватерлинии способствует 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 $\tau_\psi \approx 2,4\sqrt{T}$ [сек] и вертикальной как $\tau_\zeta \approx 2,5\sqrt{T}$ [сек] качки корабля, где T [м] – осадка, не особо велики. Это означает существование достижимой скорости хода относительно гребней и видимых фронтов штормовых волн, при которых резонансные явления неизбежны.

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

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

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

Безусловно, полезным качеством обводов корпуса является взаимокомпенсация силовых воздействий встречного набегающего потока, предотвращающая возникновение ходового дифферента и изменение посадки на всех скоростях хода, включая закритически высокие скорости с корабельной волной, соизмеримой по длине с характерным для района плавания штормовым волнением.

Обобщенно, при формировании геометрической концепции корабельных обводов необходимо следовать условиям взаимокомпенсации встречных потоков в плане гашения спутных вихрей вблизи обшивки корпуса с минимизацией интенсивности всего спектра корабельного волнообразования, что в теоретическом плане будет соответствовать принципу взаимности по уменьшению силового воздействия со стороны внешнего морского волнения.

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

Корабельное волнообразование, также как и воздействие штормовых волн, происходит полосе бортовой обшивки на уровнях переменных ватерлиний, омываемых под воздействием вертикальной и кильевой 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 расчетах также не используется проседание ватерлиний в средней части корпуса, не учитывается изменение посадки и ходового дифферента на больших скоростях хода корабля.

Упрощенная по Мичеллу математическая модель корабельного волнообразования и взаимодействия корабля с морским волнением строится для сопостави-

мых по характеристикам излучаемых и поглощаемых корпусом корабля прогрессивных трохоидальных волн с относительно невысокой крутизной. Именно это является необходимым инструментарием для изначального оценочного анализа и последующего проектного синтеза элементов корабельных обводов и общекорабельной архитектуры для корабля повышенной штормовой мореходности в целом.

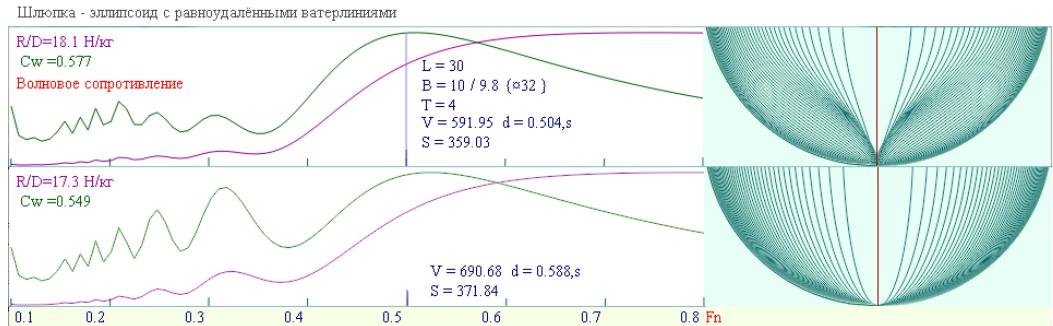
Чисто оценочный механизм излучения и внутренней гидромеханики корабельных волн позволяет прорабатывать концептуальные решения о возможности беспрепятственного прохождении штормовых волн через корпус корабля, с минимальными искажениями волновых фронтов и минимальным силовым воздействием на корабль.

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 раз渲а 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 ходовый дифферент с искривлением ватерлинии под действием быстрых потоков вблизи судовой обшивки.



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 [H/kg]. Справа теоретические (расчёты) шпангоуты в проекции корпуса.

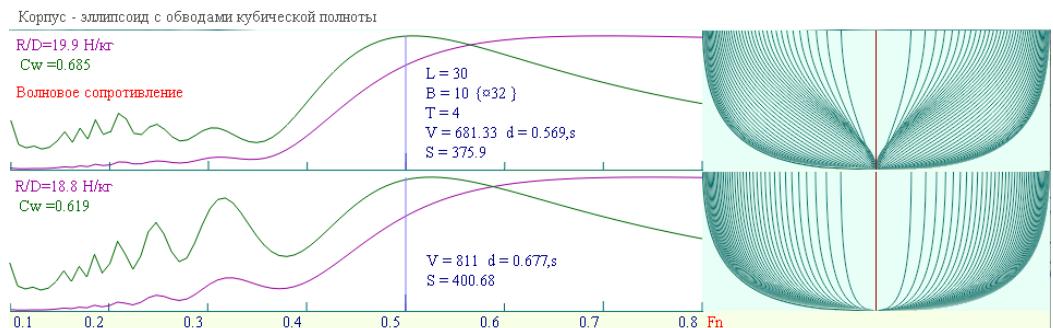


Рис. 13. Полнота корпуса 3-й степени. Предпоследний экстремум по $F_n \approx 0,32$, также как и для меньших скоростей хода, проявляются усиливением интенсивности кильевой и бортовой качки под воздействием соизмеримых по длине штормовых волн.

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
Ф-миделя δ	округл. 0,504	3 ⁱⁱ -ст. 0,569	округл. 0,588	3 ⁱⁱ -ст. 0,677	округл. 0,504	3 ⁱⁱ -ст. 0,569	округл. 0,588	3 ⁱⁱ -ст. 0,677
R-масштаб	18,1	19,9	17,3	18,8	-	-	-	-

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 волновом 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 сколовых обводов в оконечностях.

Для меньших скоростей хода (Рис. 13) при $Fn < 0,4$, 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 сколовых обводов в угоду «струйной системы» добавочной полноты, что оказывается значительным усилением интенсивности воздействия штормовых волн на сколовых поверхностях в оконечностях корабля. Этот эффект хорошо виден в расчётах с простыми эллипсоидальными обводами корпуса (Рис. 13, Таблица 1), где в расчетах двукратный рост волнообразования на фазовых скоростях излучения расходящихся корабельных волн, и в опытных испытаниях на воде

(Рис. 14) проявляется крутым и высоким гребнем расходящейся корабельной волны, и, как следствие, усиленной бортовой и килевой качкой на ходу на троходальном 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.

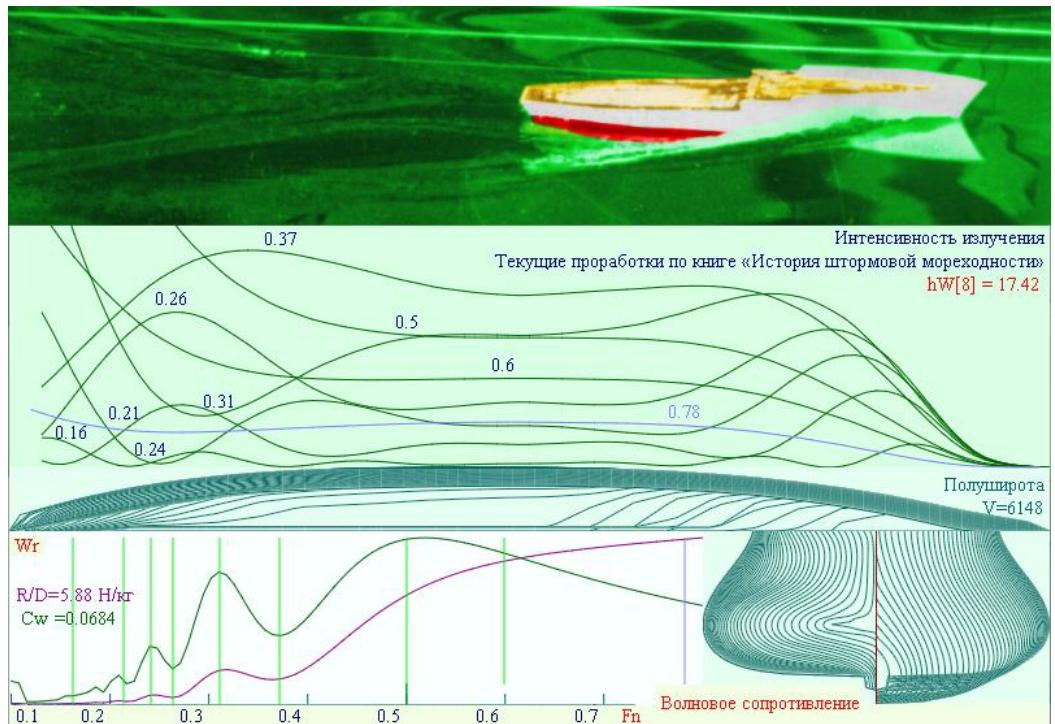


Рис. 14. Вычисление волнового сопротивления; интенсивности излучения и интерференции корабельных волн у корпуса опытовой модели из 1979-1980 гг.

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.

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 опытным бассейне для изучения теории корабля в Калининградском мореходном училище.

Последующая доработка обводов (Рис. 14) выполнялась в Севастопольском экспериментальном конструкторском бюро на борту научного судна СРТМК¹¹ «Зайнулла Мустакимов» в Чёрном море.

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. 14), но уже в гравитационной системе опытного 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 прибыток 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 отношениями 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.

В результате расчётов волнового сопротивления получается, что для судна с эквидистантными скуловыми ватерлиниями (Рис. 14) характерно интенсивное волнообразование с крупными обрушающимися гребнями расходящихся корабельных волн на скоростях хода порядка $F_n \approx 0.3$, что не мешает вполне оптими-

¹¹ СРТМК – средний рыболовный траулер кормового траулования.

стичным оценкам коэффициента волнового сопротивления на больших скоростях хода $Fn \geq 0.5$, обусловливаемым весьма заметным завалом борта на уровне действующей ватерлинии.

В экспериментах в опытном бассейне Ленинградского кораблестроительного института (Рис. 15) 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.

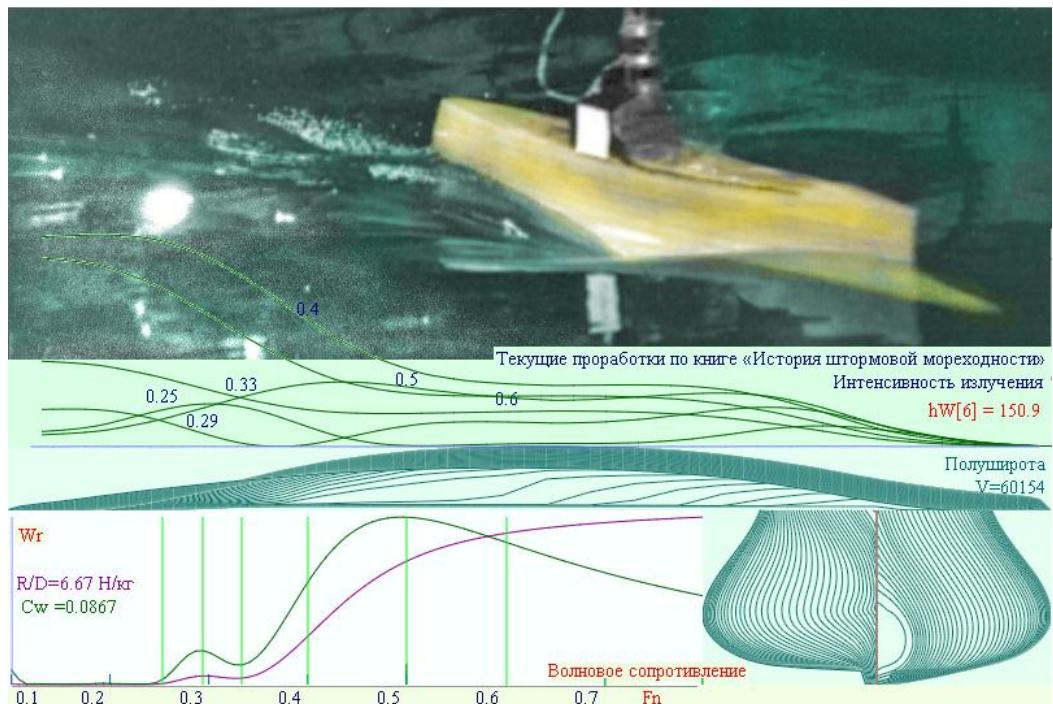


Рис. 15. Обводы носовой скулы модели МИДВ-85 лишь отчасти учитывают необходимость плавного затягивания встречного набегающего под днище корпуса, отчего в расчетах проявляется экстремум на кривой волнового сопротивления на скорости $F_n = 0,3$. В эксперименте, верхнее фото, модель показывает образование крутой расходящейся корабельной волны, которая в противофазе вместо отрыва от борта начинает оголять днище корпуса за пределами носовой скулы.

Сравнительные испытания гиперболизированной модели МИДВ-85 в сопоставлении с быстроходным судном 60-серии ($\delta = 0,572$) подтверждали значительно

лучшие ходовые и мореходные качества (Рис. 24) 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 опытном бассейне Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета также показывали превосходные мореходные качества в сравнении с моделями МИДВ-85 и 60-серии.

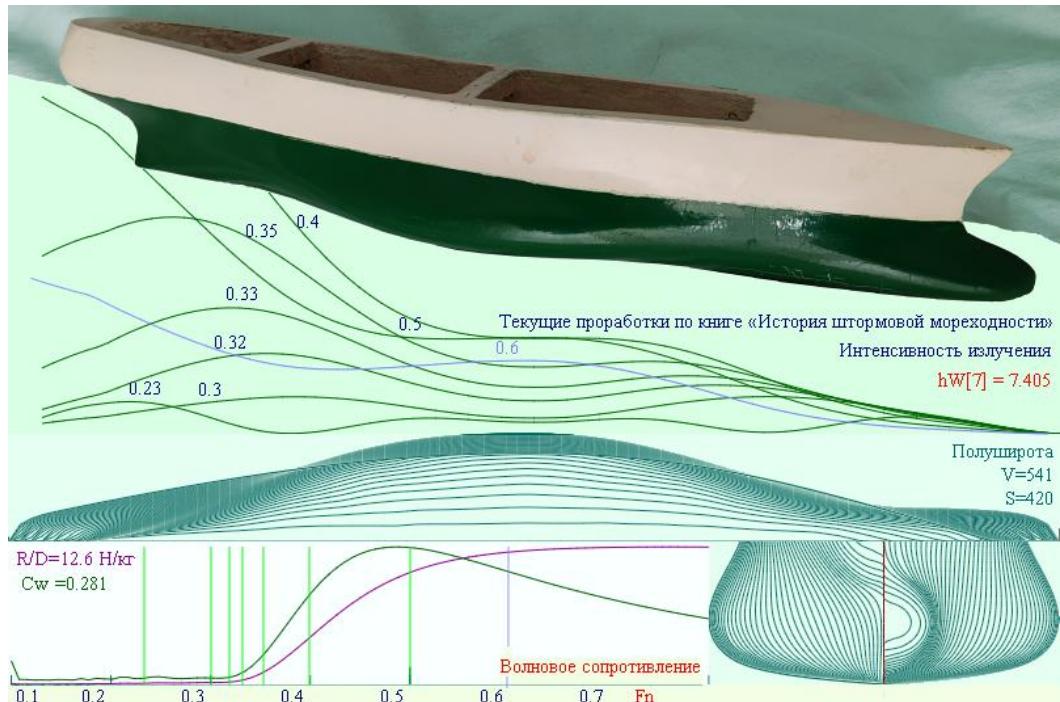


Рис. 16. Аналогичные оценки интенсивности корабельного волнообразования и волнового сопротивления для обновлённых в 1987 году обводов корпуса со склоновыми сужениями носовых и кормовых ветвей шпангоутов для плавного сопряжения набегающих потоков между бортовыми и днищевыми поверхностями.

В другом примере (Рис. 16), со специально разработанной моделью по результатам большой серии мореходных испытаний в опытном бассейне кафедры теории корабля Ленинградского кораблестроительного института, складывается благоприятная интерференция корабельных волн, что наглядно представляется на кривой волнового сопротивления вплоть до скоростей хода $Fn \approx 0.35$. Некоторое

превышение волнового сопротивления на $Fn \approx 0.5$ 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 опытной 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 вполне подтверждают соответствующие результаты вычислительных оценок ходкости по Мичеловским расчётам волнового сопротивления корабля. На большой скорости хода $Fn > 0.5$ крупная расходящаяся волна не влияла на подпорный поток у носовой скулы, отчего отмечался небольшой ходовой дифферент на нос.

На относительно длинной волне в эксперименте наблюдается взаимокомпенсация внешних силовых воздействий, со значительным снижением интенсивности килевой качки и, как следствие, вертикальных ускорений в оконечностях корпуса на ходу корабля, что в целом соответствует проектным требованиям по условиям обитаемости и сохранности грузов на борту перспективного корабля.

«Аврора», «Ташкент», «Киров» – килевая качка и ходкость на волнении

Поверяя рукой плавность подводных обводов в носовой оконечности модели крейсера «Аврора» можно выявить небольшую выпуклую округлость подводных ветвей носовых шпангоутов, означающую своеобразный огрех с устройством «системы струйного обтекания¹²» ради увеличения полноты корпуса и водоизмещения 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», с расчётной скоростью хода по Фруду более чем $Fn > 0.5$, когда интенсивность корабельного волнообразования более всего зависит от формы мидельшпангоута. Однако, в движении на относительно коротких ветровых волнах, с

¹² 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».

длиной менее длины корпуса «Касатки», вряд ли усиливаемая полной носовой скулой качка позволит безопасно разогнаться до заданного штормового хода, останавливая корабль в режиме штормования малыми ходами носом на волну с никак неоправданной интенсивностью килевой и бортовой качки.

Упрощение геометрии обводов корпуса для режима «струйного обтекания» может обосновываться 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.

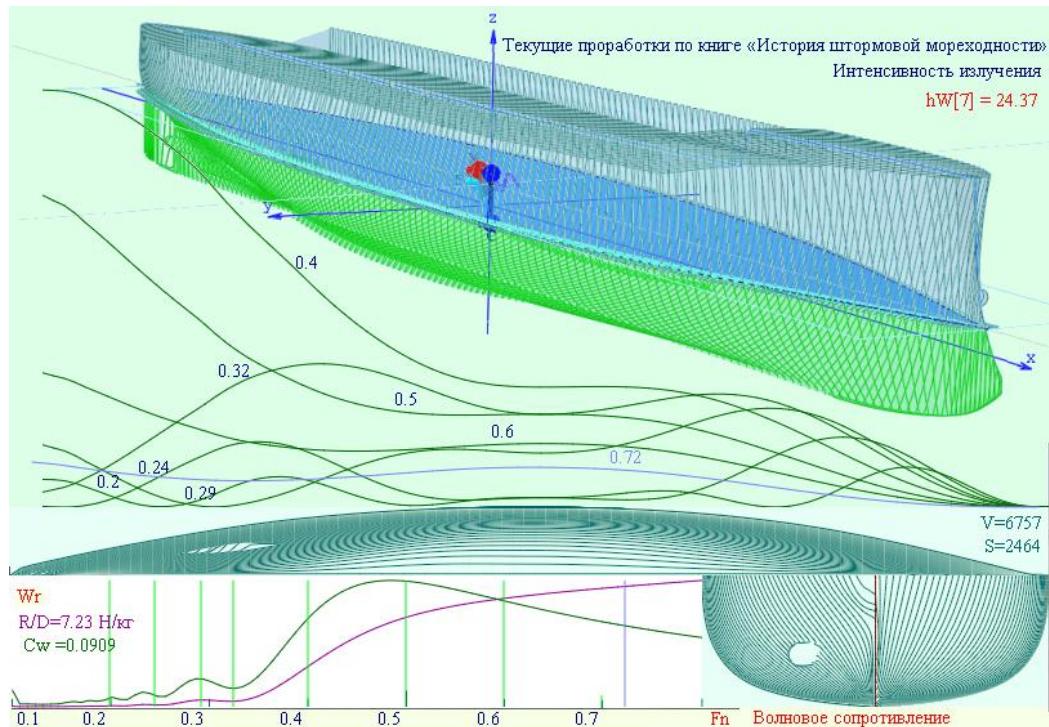


Рис. 17. Результаты расчётов интенсивности корабельного волнообразования и волнового сопротивления для крейсера I-ранга «Аврора».

Обводы корпуса крейсера «Аврора» справедливо оценивать практически идеальными в плане всепогодной мореходности, и в целом по штормовой ходкости (Рис. 17) 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 экс-

тремумов по высоте и крутизне расходящейся корабельной волны (Рис. 17), и как следствие, прогнозируется несколько большая интенсивность силового воздействия штормовых волн с соизмеримыми характеристиками по фазовой скорости $F_n \approx 0,33$, набегающих извне на корпус 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 судостроительной компании «Одеро-Терни-Орландо» (*Odero-Terni-Orlando Società per la Costruzione di Navi*).

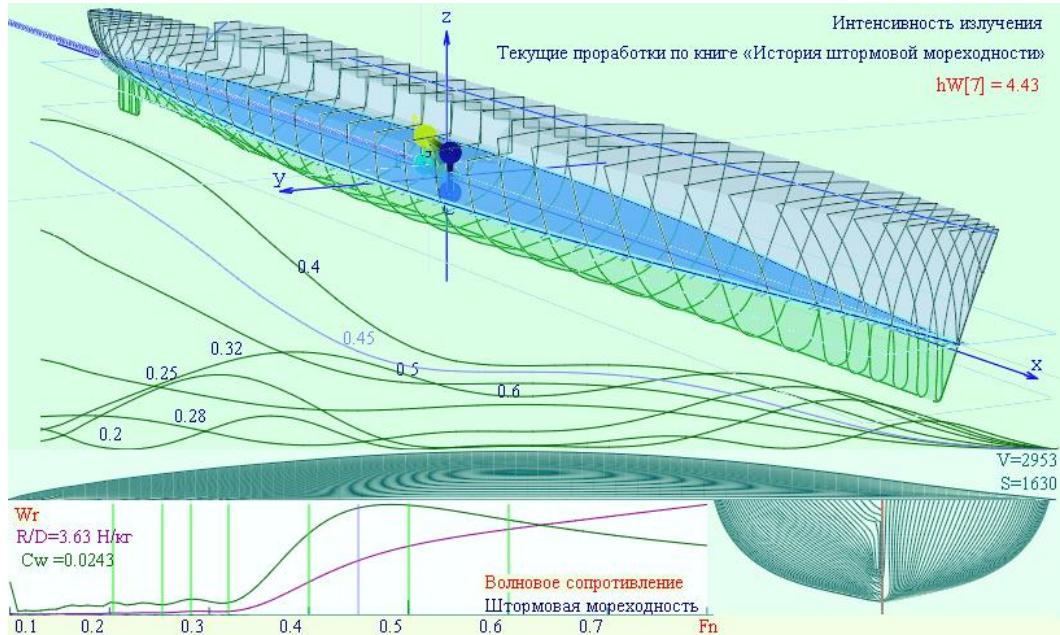


Рис. 18. Лидер эсминцев «Ташкент» итальянской постройки – образец формирования V-образных клиперских сколовых обводов как в носовой, так и в кормовой оконечностях корабля.

Лидер «Ташкент» отличался особой ходкостью (Рис. 18), 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 склоне 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. 18), и в соответствии с принципом взаимности излучения и отражения в гидромеханике волновых процессов обеспечивается стабилизации килевой качки, как это оговаривается в изобретении¹³ «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.

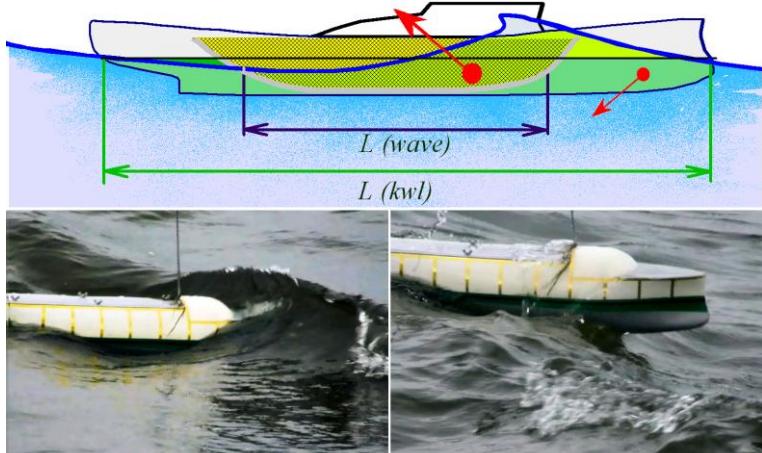


Рис. 19. Гидромеханика килевой качки интерпретируется с использованием исторического понятия волнообразующей – волновоспринимающей длины корпуса $L(\text{wave})$, за пределами которой на $L(\text{kwl})$ корпус подпадает под прямые удары прогрессивных трохоидальных волн, где склонные обводы и относительно низкий надводный борт должны способствовать стабилизации качки

Экспериментальная проверка концептуального решения (Рис. 19, два фото внизу) превзошла прогнозы частичного ослабления килевой качки. Визуально корпус удерживался строго горизонтально¹⁴, килевая качка не наблюдалась вовсе,

¹³ «Корабль без килевой качки на ходу на волнении». Храмушкин В. Н. Роспатент. Рег. № 2007133625 от 2007.09.07, вх. № 036722. Бюл. № 8 от 2009.03.20.

¹⁴ 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.

что формально представляется трансформацией угловых колебаний в чисто поступательные вертикальные.

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 взаимо-компенсацией 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 оказывается 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 потерпе хода, модель корабля приводится к естественному состоянию с сильной килевой качкой удлинённого тела под гидростатическим воздействием трохоидальных гребней штормовых волн.

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. 20), создающими чрезмерные пульсации внешних сил под воздействием штормовых волн. Другой корабль для со-поставления 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»¹⁵ 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 части корабля. Но всё же, если у лидера «Ташкент» (Рис. 18) пик сопротивления на

¹⁵ Цифровая модель «Кирова» лишь в целом похожа на обводы настоящего корабля, но всё же, обобщённые выводы по отчастиискаженному корпусу не утрачивают актуальности.

скорости $Fn = 0,25$ всего $R/D=0,025$ [Н/кг], то у крейсера «Киров» почти на порядок больше $R/D=0,22$ [Н/кг].

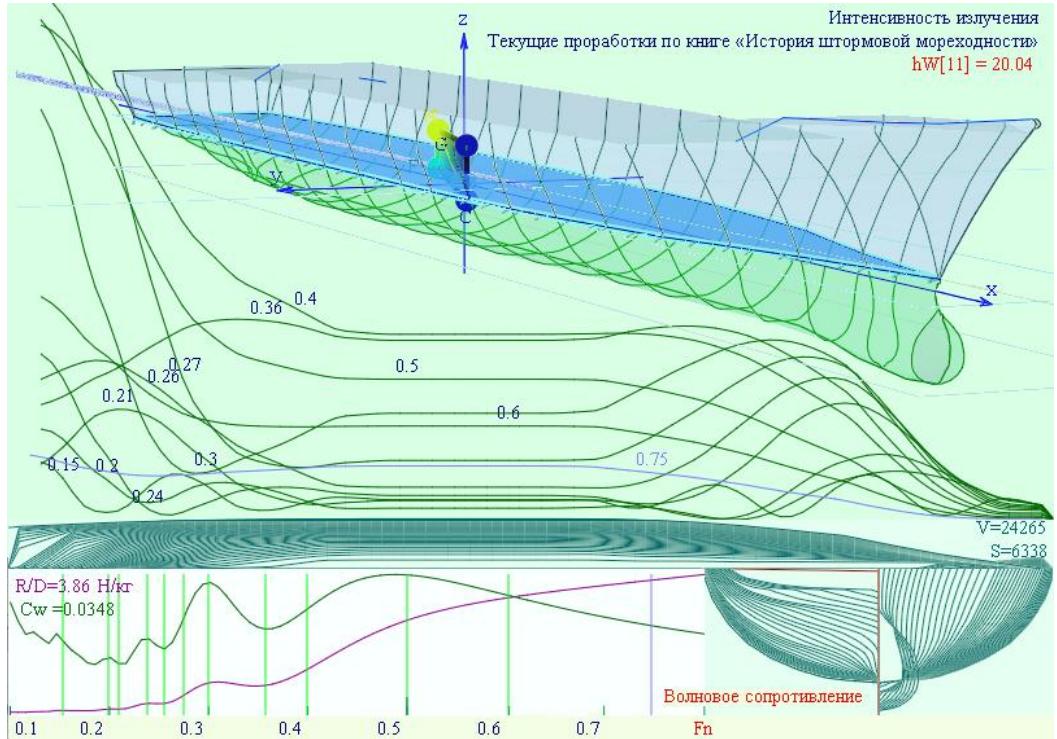


Рис. 20. Крейсер «Киров» с эквидистантными ватерлиниями «струйной системы обтекания» по носовой склоне.

По-видимому, на результаты расчётов по Мичеллу влияют ограхи 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 $Fn \geq 0,8$, максимумы величин волнового сопротивления вполне сопоставимы Для «Ташкента» и «Кирова», что характеризует сходные размерения корпусов и неплохие гидродинамические качества мидельшпангоутов обоих кораблей.

В зоне склоновых обводов крейсера, за бульбовым форштевнем всё могло бы быть существенно лучше. Хорошо отлаженный бульб должен в помошь клиперским обводам и без нарушения плавности усиливать закручивание потока под днище корпуса корабля, как это устроено у лидера «Ташкент» (Рис. 18). 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.

Опытовые 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 опытной модели (Рис. 7 и Рис. 15) 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 возврениям корабельных инженеров второй половины XX века.

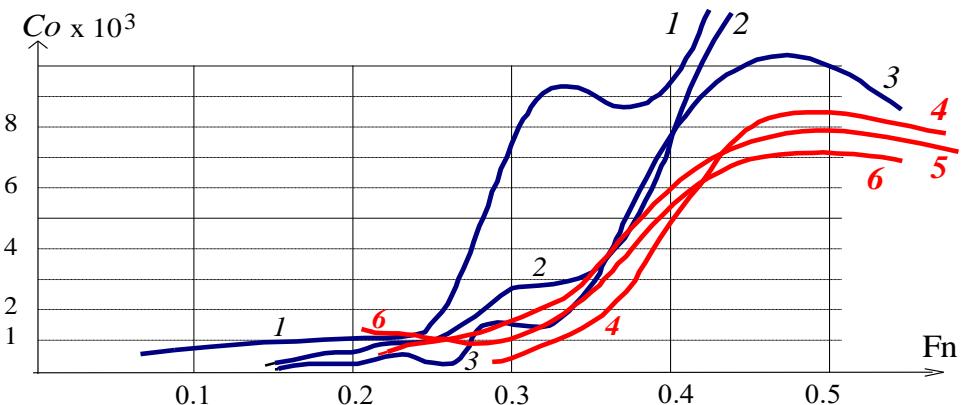


Рис. 21. Сравнительные кривые коэффициентов остаточного сопротивления моделей. 1. Эталонная модель «Victory»; 2. Модель 60-й серии; 3. МИДВ, осадка: $T=135$ мм; 4. $T=125$ мм; 5. $\Delta T=40$ мм на корму; 6. - ход кормой вперед; 1÷3 – испытание в гравитационной системе; 4÷6 – под буксировочной тележкой.

Гидродинамической особенностью и достоинством мореходных экспериментов в Ленинградском кораблестроительном институте представляется уникальная гравитационная система опытного 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.

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 ха-

рактером кривизны шпангоутов на уровне действующей ватерлинии (Рис. 21 – *кривые 3÷6*), отчего в проекте обводов модели МИДВ предусматривалось построение теоретических ватерлиний в окончностях равноудалённо одна от другой, что впоследствии сказалось усилением корабельного волнообразования вблизи скуловых обводов в окончностях корпуса.

При выделении остаточного сопротивления (волнового и формы) модели использовался стандартный коэффициент ITTC¹⁶-57 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.

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 вратного хода под ударами гребней встречных волн, что единственно соответствует реальной ходкости корабля в штормовых условиях плавания.

По графикам (Рис. 21) подтверждаются результаты численных расчётов волнового сопротивления, прогнозировавших улучшение ходкости на больших скоростях хода при $Fn \geq 0,5$, которое достигается за счёт 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 $Fn \approx 0,5$, при дальнейшем разгоне высота волны заметно снижается, что объясняется стабилизацией динамической посадки корпуса за счёт завала бортов в районе действующей ватерлинии (вместо привычного ходового дифферента проявляется взаимокомпенсация локального волнообразования, в том числе с проявлением эффекта «антаглиссирования»).

¹⁶ — 8th International Towing Tank Conference, Madrid, Spanish, September 1957,
 $C_F = 0,070 \cdot (\log_{10} Rn - 2,12)^{-2}$

Для моделей с традиционными обводами 60-серии и «Victory» превышение скоростей хода выше $F_n > 0,5$ представлялось противоестественным и опасным ввиду возможного повреждения моделей, их гравитационной тяги и измерительной оснастки.

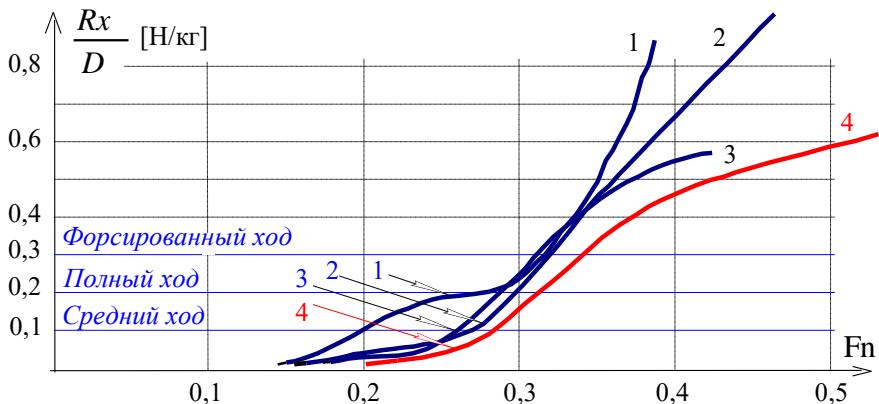


Рис. 22. Удельное остаточное сопротивление моделей. 1. «Victory»; 2. 60-й серии; 3. МИДВ, $T = 135$ мм; 4. МИДВ при оптимизированной посадке: $T=125\text{мм}$; $\Delta T=20\text{мм}$ на корму. 1÷3 - испытание в гравитационной системе; 4 - на буксировочной тележке.

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 форм и размерений корпуса.

Все три опытные модели имели схожие соотношения размерностей корпуса, и поэтому по ходкости на тихой воде были выбраны три режима гравитационной тяги (Рис. 22), 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.

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 расчётом режиме, соответствующем экономическому 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. 23). 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: $\lambda = g T^2 / 2\pi$, что следует из дисперсионного соотношения для волн на глубокой воде: $\omega^2 = g \cdot k$, $\omega = 2 \cdot \pi / T$, $k = 2 \cdot \pi / \lambda$.

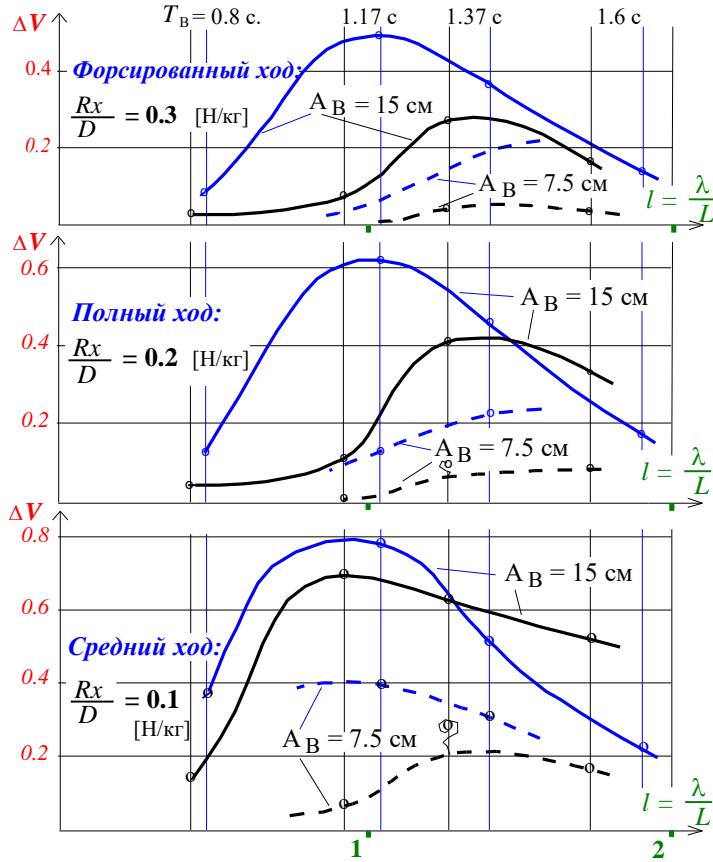


Рис. 23. Сравнение величин потери хода на волнении модели с корпусом МИДВ (черные кривые) и модели быстроходного судна 60-й серии с $\delta=0.572$ (синие кривые).

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

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.

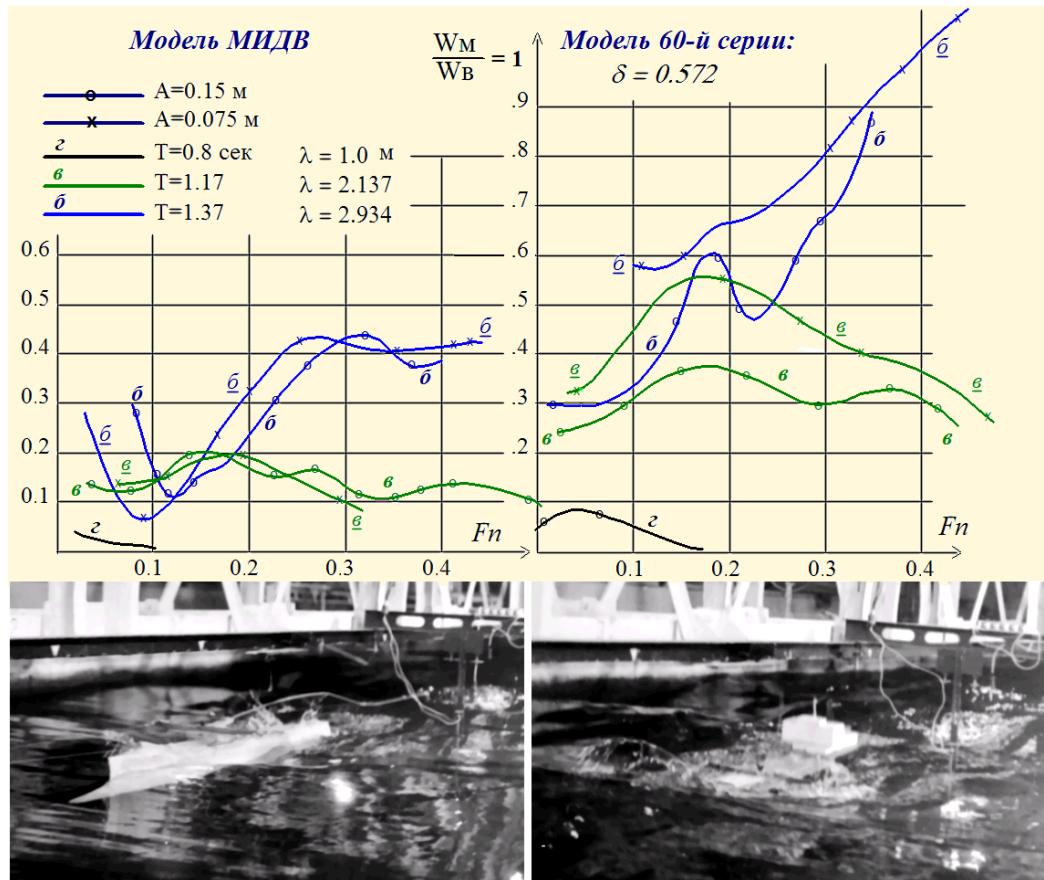


Рис. 24. Интенсивность килевой качки в зависимости от скорости хода в различных условиях встречного регулярного волнения с нормировкой на вертикальные ускорения частиц жидкости в гребне волны. По вертикальной шкале соотношение ускорения в окончностях моделей в сравнении с вертикальными ускорениями в 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 проявлением невесомости, на борту широкопалубных судов (Рис. 24, кривая б 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. 23) преимущество в ходкости может проявляться только в сравнении с результатами испытаний гиперболизованных обводов конкретной модели МИДВ, которая строилась для проведения опытных 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. 24 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 (среднеустойчивый) размах килевой качки, с экстремальными всплесками в записях бортового гирогоризонта 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, опытные 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 нефтепромысловой компании «Сахалинская энергия» строилось пять самоходных телеуправляемых моделей кораблей и судов повышенной штормовой мореходности. Четыре модели были представлены к мореходным испытаниям в опытном 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 опытных 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 трохоидальном волнении. Задействовалось 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.

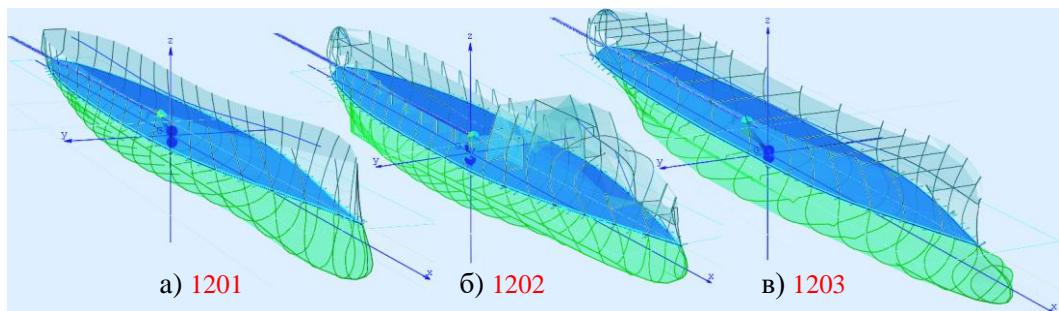


Рис. 25. Прорисовки цифровых моделей для трёх (из пяти) проектов кораблей и судов, разработанных в рамках контракта Главного управления кораблестроения России в 2001 году, и успешно прошедших полный цикл мореходных испытаний в опытном бассейне Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Условные названия моделей: а) корвет-1021; б) буксир-1202; в) транспортное судно-1203(Univer-86).

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 опытного бассейна.

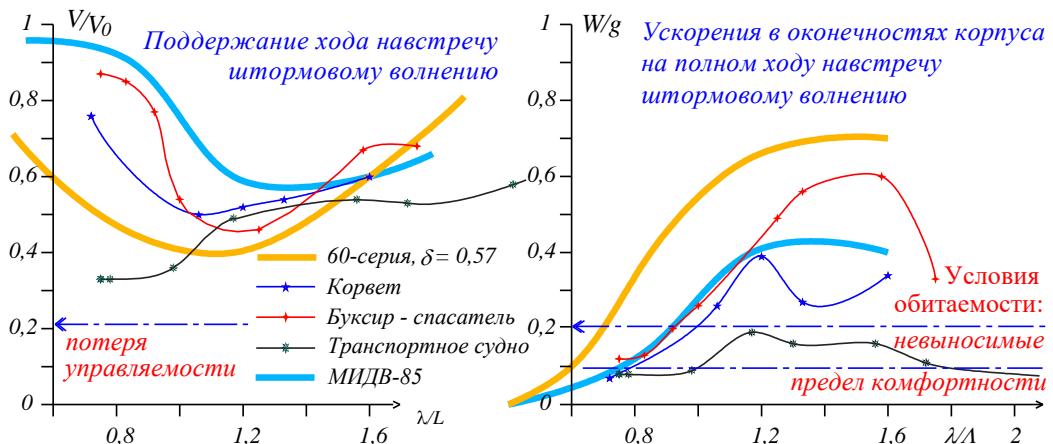


Рис. 26. Обобщенные результаты опытных испытаний ходкости (слева) и килевой качки (справа) моделей судов, оптимизированных для штормового плавания. Как и ожидалось, ходовые качества моделей перспективных судов оказались несколько лучшими, чем у традиционного быстроходного судна 60-серии, но худшими в 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. 26, слева) специальными значками отмечены все результаты телеметрических измерений, которые при сопоставлении с оценками наблюдений по видеозаписям признаны вполне достоверными.

Мореходные испытания моделей судов в гравитационной системе, и особо опыт работы с телеконтролируемыми моделями, позволяют сделать проектные и эксплуатационные оценки мореходных качеств испытуемых 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 комфорtnости обитания на борту судна;*

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

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

судно становится чувствительным к инородным нелинейным эффектам, которые в традиционном проектировании считаются несущественными.

Как вариант компенсации этих относительно слабых возмущений, предлагается к использованию унифицированное устройство активной стабилизации остаточной килевой и бортовой качки оптимизированного корпуса ([Рис. 26, справа](#)), согласованное в действии с пассивным механизмом аварийного поддержания штурмового 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 опытных 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 опытных 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 опытных 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 опытном 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 «брочинга» 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 более не теряла, и других аварийных ситуаций не создавалось.

Лишь подобные случайные катастрофы с моделями на регулярном волнении в опытном 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 опытных 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.

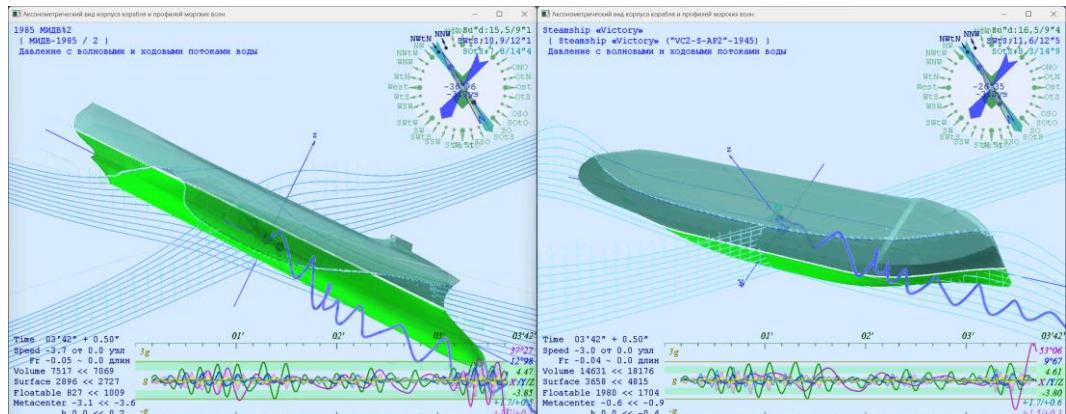


Рис. 27. Синхронные испытания МИДВ-85 и «Victory» без хода на трёх групповых структурах волн: $\lambda = \{ 1,0, 1,75 \text{ и } 2,5 \} \cdot L$ – относительно длины корпуса, с высотами $h = \{ 1,0, 0,4 \text{ и } 0,2 \}$ – от максимума трохоидального гребня, что составляет $\zeta = \{ 16,6, 11,6 \text{ и } 8,3 \}$ м по высоте, соответственно. Курс на встречу 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.

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. 27). 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 экспе-

римента 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.

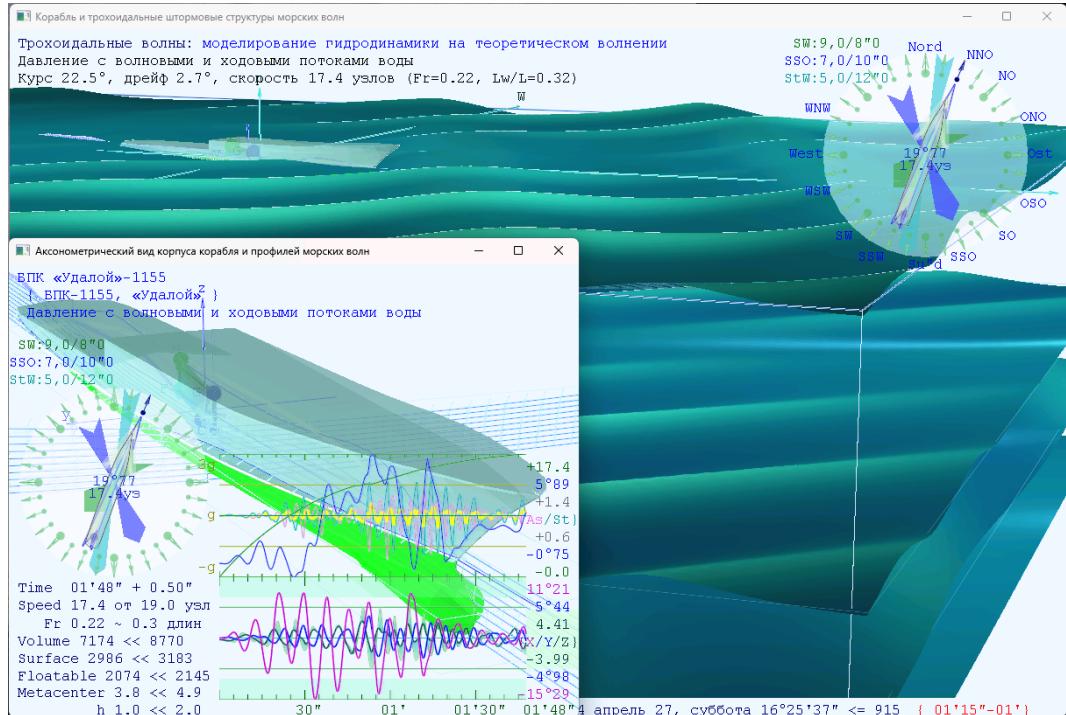


Рис. 28. В ходе вычислительного эксперимента задействуются два графических окна для представления морского волнения и корпуса корабля с метацентрическими отметками и графиками его динамики на ходу на волнении. На графиках ускорений в оконечностях, внизу слева, по шкале времени на 30" и 47" секундах фиксируется 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 из-

меняться 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 заглублениям 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. 28) 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 опытных и вычислительных экспериментов

Проведение вычислительного эксперимента в программном комплексе «Aurora» реализуется в интерактивной графической среде. Единообразие началь-

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

Интенсивность силового воздействия штормовых волн на корпус корабля в наибольшей степени зависит от выбора курса и скорости хода относительно гребней групповых структур морского волнения. Нерегулярное волнение на море всегда нарушает симметрию волновых склонов от борта к борту корабля, образуя внешнее поперечное воздействие по схеме лагом к волне при движении произвольными курсами относительно гребней групповых структур трохоидального штормового волнения. Интенсивность качки выше уровня комфорtnости 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, кильевая 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 успо-

коителей качки¹⁷, подверженных прямому воздействию быстрых потоков воды в трохоидах под штормовыми волнами.

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. 9) 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 отсчетом уровня тихой воды становятся крутые склоны штормовых волн, то вышеназванные проектные решения (опусы) объясняют лишь естественные ожидания интенсивных внешних силовых воздействий в темпе штормовых волн.

Первые сравнительные вычислительные эксперименты показывают, что в начальных фазах внешнего силового воздействия забортные кили повышают интенсивность динамических реакций, и лишь после угасания гребней штормовых волн, в соответствии с изначальным предназначением бортовые кили служат демпфированию бортовой качки корабля. Вышеназванным патентом (Рис. 9) 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

¹⁷ 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.

аксиоматика отрицательна, то есть в практическом плане возможно лишь снижение 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 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 килями 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 «Aurora» не задействованы модели вязких течений жидкости, и, во избежание полной взаимокомпенсаций 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 сил¹⁸. Интегральная величина сил от давления на притягивающей стороне (отрицательного давления) может отличаться от их естественного проявления на бортовых килях корабля, гидромеханика которых более определя-

¹⁸ Здесь использован коэффициент $k_v = 0$ – обнуление отрицательного давления в потоке притяжения строго по нормали к элементарной расчетной площадке.

ется масштабами выступающих частей и скоростями в локальных потоках жидкости.

На рисунке ниже синхронные вычислительные эксперименты с удлинёнными бочками на трохоидальном волнении с длиной 100 метров и периодом 8 секунд, с половиной 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 килями топчется на месте со значительным дрейфом в сторону правого борта.

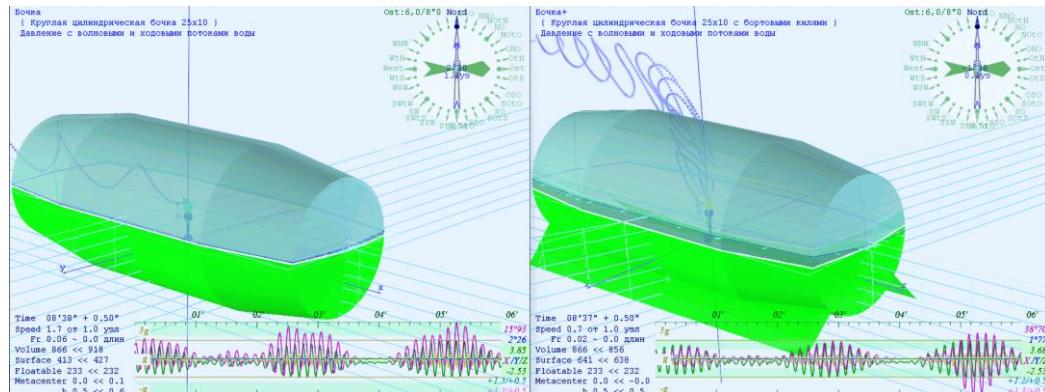


Рис. 29. Слева круглая цилиндрическая бочка на волне, справа она же, но с бортовыми наклонными килями. Длина волны $\lambda = 100$ м, высота $\zeta = 6$ м, ширина бочки $B = 10$ м, метацентрическая высота $h = 0,5$ м. Чистый корпус обретает размах качки до 16° . Тот же корпус с бортовыми килями усиливает размах крена при бортовой качке до 39° .

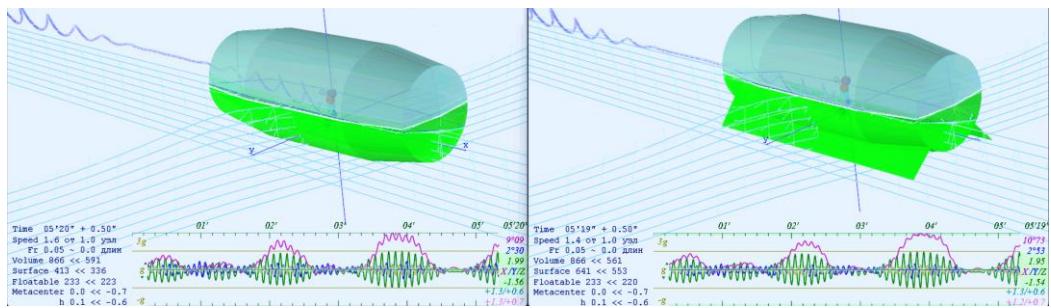


Рис. 30. Аналогичный синхронный эксперимент при длине волн $\lambda = 50$ м с высотой $\zeta = 3$ м, при этом метацентрическая высота уменьшена до 1% ширины, и составляет 10 см. Период качки теперь огибает пульсации штормовых волн, при этом крен от поступательного дрейфа у чистого корпуса в целом меньше, хотя высокочастотные пульсации под ударами гребней волн чуть больше.

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 тakt волновых колебаний.

Величины килевой и вертикальной качки, так же как и вертикальные ускорения в оконечностях для обоих моделей, в данном вычислительном эксперименте, можно считать вполне сопоставимыми.

В вычислительном эксперименте (Рис. 30) 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 волн 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 $9^{\circ}1$ до $10^{\circ}73$, что на 15% больше чем у чистого бочонка без выступающих частей.

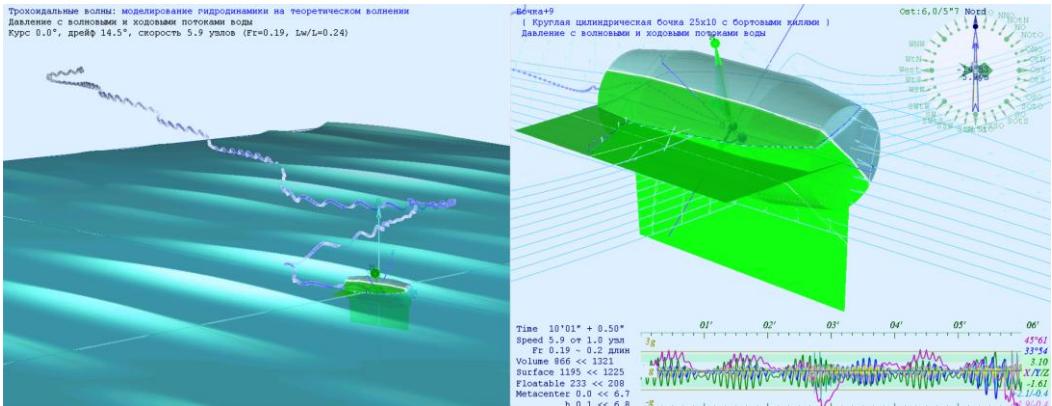


Рис. 31. Вариант опытов с бортовыми килями значительно большей площади.

В дополнительном эксперименте по экстремальной динамике плавания (Рис. 31) 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 броунинг, дельфинирует или получает сокрушительные гидродинамические удары по выбрасываемым из воды бортовым килям. 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.

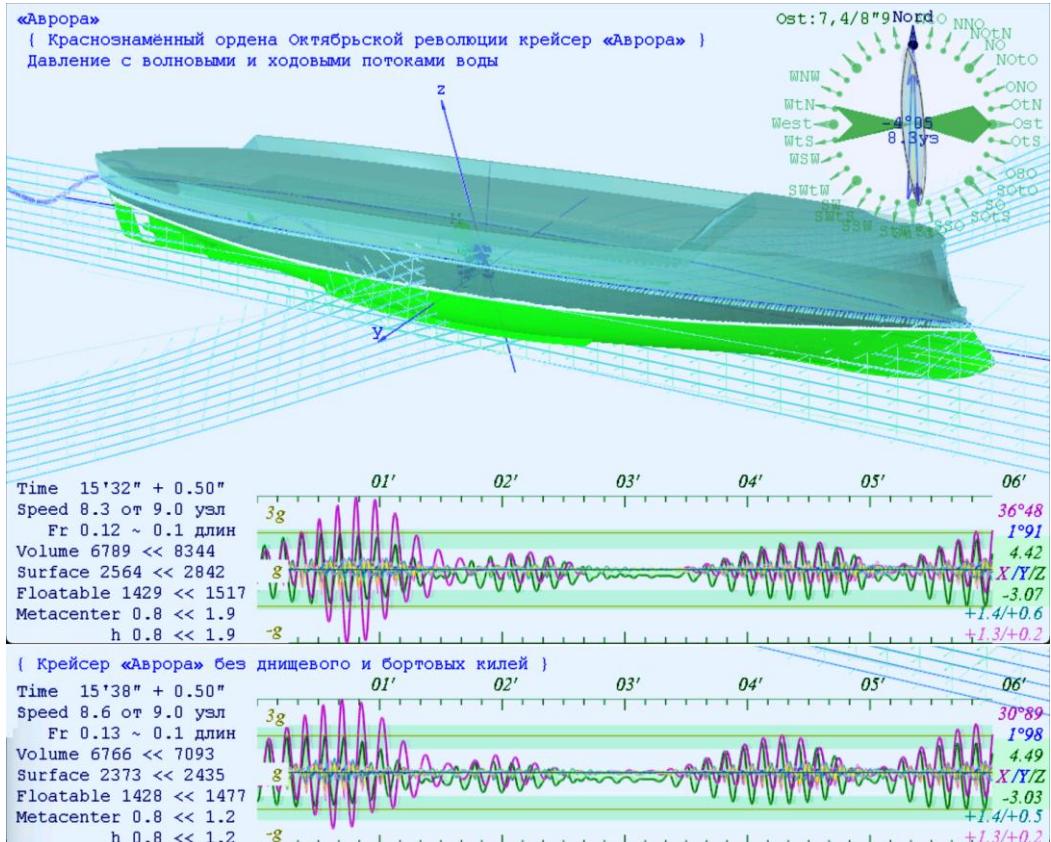


Рис. 32. Синхронный вычислительный эксперимент с мореходными испытаниями крейсера «Аврора» с чистым корпусом – нижние графики; с днищевым и бортовыми килями, и кормовым рулём – верхние графики качки.

Специальный вычислительный эксперимент (Рис. 32) посвящён опытам с цифровой моделью крейсера «Аврора» без подводных выступающих частей, с последующим сопоставлением результатов по тому же корпусу с днищевым и бортовыми килями; и с весьма большим по площади кормовым рулём управления.

Сразу отмечаем, что какого-либо положительного эффекта от днищевого и бортовых киляй для крейсера «Аврора» не подтверждается. Возможно, что причиной малых отличий в результатах вычислительных экспериментов является гидродинамическая взаимокомпенсация внешних штормовых воздействий на безуспешно отработанных обводах крейсера, что ранее принципиально допускалось схемами гидромеханики из патента 2007 года № 2360827 «Корабль без бортовой качки на волнении». *Положительный эффект возможно существует, но лишь в демпфировании слабых гармонических воздействий от совсем уж малых синусоидальных колебаний.*

Модель крейсера в эксперименте имеет малый ход 9 узлов лагом к волне, подходящей к кораблю с левого борта. Длина одиночных волн в групповых структурах устанавливается равной длине крейсера в 124 метра, с периодом 8,9 секунд, и высотой девятых валов в 50% от максимума 7,38 метров. Начальная метацентрическая высота корабля выбирается по упоминаниям о штормовом плавания «Авроры» в шторм Индийском океане, это порядка 0,8 метров, что соответствует собственному периоду бортовой качки корабля порядка 15 секунд.

Несмотря на большую в 23 тонны (+0,34%) массу корпуса с рулём и объемными килями, в результатах опытных испытаний пересиливают неблагожелательные эффекты иного рода. Экстремальные углы бортовой качки возрастают с 30° до 36° (по правому борту), что составляет превышение по максимальному крену 18%. К тому же на корпусе с выступающими частями отмечается и больший размах качки, до -73° против 54° . По записям качки без килей (Рис. 32, нижние экстремумы) по левому борту максимальный крен не превышает 24° , в сравнении с теми же 36° для корпуса с выступающими частями.

Для контрастности проявления отличных результатов в опытных испытаниях 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, что физически соответствует возможности возникновения частичной кавитации на поверхностях обратных к набегающему потоку. По умолчанию же в программном комплексе «Aurora» используется коэффициент $k_v = 0,5$, что в вышеописанных опытах снижает отличие максимальных углов крена для крейсера «Аврора» с 18% до одного процента ($\Delta \leq 1\%$). На динамике штормовой качки не проявляется тенденций к существенному различию параметров мореходности, форма и величины в записях углов крена, и асимметрия экстремальных величин с килями и без килей в целом не проявляются,

Тогда допустимо предположение о корректности проведения сравнительных мореходных испытаний по форме корпуса корабля без учета бортовых – демптирующих¹⁹ успокоителей качки, так как в случае фактора взаимокомпенсации отрицательных давлений $k_v = 0,5$ в экспериментах с идеально отработанными обводами крейсера «Аврора» не выявлено значимых различий.

¹⁹ Взаимокомпенсация давлений относительно нормалей к набегающим потокам вблизи подводных крыльев и на кавитирующих реданах регулируется коэффициентом $k_v \in [0÷1]$

{ 5415 US Navy Combatant + sidekeel+rudder }
давление с волновыми и ходовыми потоками воды

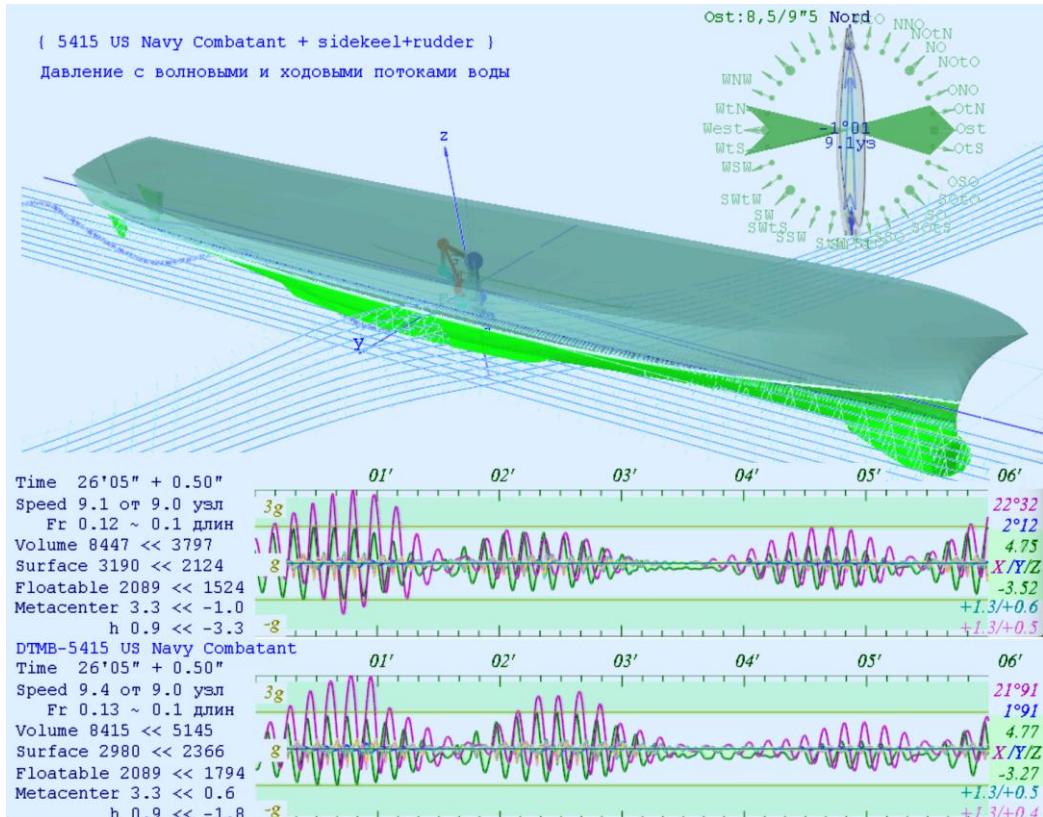


Рис. 33. Аналогичные синхронные испытания для опытного корабля DTMB-5415.
На верхних графиках корабль с бортовыми килями и кормовыми рулями,
нижние –для чистого корпуса.

Корпус корабля DTMB-5415 (Рис. 33), с развесистыми ветвями носовых шпангоутов, глубокопосаженным бульбом, сильным развалом борта и широкой транцевой кормой, трудно назвать гидродинамически хорошо согласованным. Однако в плане технической эстетики, гладкие и плавные обводы корпуса с клиперской носовой скулой должны показывать прекрасные ходовые качества и, как следствие, умеренно ослабленное силовое взаимодействие с морским волнением.

В сравнительных экспериментах также выставляется длина волны по длине корпуса, с крутизной волновых склонов такой же, как в экспериментах с крейсером «Аврора». Отличие в измерениях величин качки в результатах приблизительно в пределах погрешностей проведения экспериментов, но всё же корпус с выступающими частями подвергается несколько большему раскачиванию.

Гидродинамическое качество обводов корпуса крейсера «Аврора» изначально считается весьма высоким, и потому формально незначимые гидродина-

мические помехи должны заметно сказываться на параметрах его мореходности. В морской практике такое оптимизационное свойство с минимальной реакцией на внешние волновые воздействия одновременно означает, что корпус крейсера может усиленно реагировать на воздействия иного рода, положительно воспринимать относительно слабые управляющие воздействия, например, при использовании в зонах стабильных или прогнозируемых потоков вблизи бортовой обшивки активных успокоителей бортовой и килевой качки не особо большой громоздкости.

В случае плохо отработанных обводов корпуса корабля бортовые кили и крылья активных успокоителей качки могут крайне отрицательно влиять на мореходные качества в штормовых условиях плавания. Но всё же, 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 для формы корпуса. Практическая отработка процессов гидромеханики на выступающих частях и бортовых килях также необходима, и вполне возможна в составе вычислительного комплекса «Augora», но такие работы целесообразно выполнять после построения наилучшей по мореходным качествам формы корпуса, и лишь в такой последовательности проектирования активные успокоители качки смогут и будут помогать судоводителям в обосновании и поддержании эффективных режимов штормового хода.

Мореходные испытания кораблей перспективного и действующего флота

В вычислительных экспериментах варьируются параметры состояния корабля и штормового моря, условно это получается до 192 опытов с каждой числовой моделью:

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

$V \{ 4 \}$ – 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;

$\zeta \{ 2 \}$ – два варианта предельно большой и относительно малой интенсивности морского волнения задаётся волях от теоретического максимума гребня прогрессивной трохоидальной волны²⁰ – девятого вала: $A = 0,8_w$ и $0,25_w$.

$\lambda \{ 3 \}$ – длина свежей ветровой волны отмеряется относительно конструктивной ватерлинии из описания к цифровой модели корпуса корабля, как: $\lambda = 0,75 \cdot L$, $\lambda = 1,0 \cdot L$ и $\lambda = 1,5 \cdot L$; Две системы волн зыби отклоняются от ветровой волны по три румба ($\pm 33^\circ 45'$) вразрез по курсу с правого борта SWtS – для волн свежей зыби; и по левому борту SOtS – для реликтовых валов длиннопериодной зыби, с размерениями в пропорциях относительно ветровой волны по длине 1,75 и 2,5; и по высоте – 0,4 и 0,2, соответственно.

$h \{ 2 \}$ – метацентрическая высота устанавливается волях ширины корпуса: $h = 0,0$ и $h = 5\%$ от B [м].

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

В опытных испытаниях участвуют цифровые модели без бортовых килей и кормовых рулей, которые могут привносить плохо прогнозируемые искажения ввиду разрывных аппроксимаций для поперечных потоков вблизи бортовой обшивки корабельного корпуса.

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 максимального гребня, и океанские (реликтовые) валы длиннопериодной зыби по длине $\lambda = 2,5 \cdot L$ [м] с относительной высотой 0,2, соответственно.

²⁰ В варианте $A = 1,0$ с обрушающимся гребнем штормовой волны происходит быстрое и непредсказуемое опрокидывание корабля – захват вихревым потоком предельной интенсивности (для новых моделей такого эффекта можно избежать).

Характеристики моделей кораблей и судов, выбранных для участия
в проведении мореходных вычислительных экспериментов.

Имя	$L_{\text{КВЛ+макс}} / B_{\text{КВЛ+макс}} / T_{\text{+макс}}$	$W / S / \delta$	$\Delta h - g^\circ$
Крейсер «Аврора»	$124_{+3} / 16,8 / 6,4$	$6758,2 / 2355 / 0,508$	$0,46\text{--}61^\circ$
Корвет А-1201	$88,6_{+1,4} / 9_{+1} / 4_{+1}$	$1863,3 / 1004,8 / 0,584$	$0,33\text{--}59^\circ$
МИДВ-1985(%)	$116_{+14} / 10,7_{+5,3} / 8$	$7520,8 / 2786,5 / 0,756$	$1,41\text{--rad}$
Steamship «Victory»	$135,3_{+3,4} / 18,9 / 8,53$	$14627 / 2750,3 / 0,672$	$0,31\text{--}43^\circ$
CPTM-К пр.502-ЭМ	$52,4_{+2,4} / 9,8_{+0,15} / 3,8_{+0,52}$	$1267,3 / 753 / 0,571$	$0,12\text{--}48^\circ$
Лидер «Ташкент»	$134_{+6} / 13,7_{-0,6} / 3,98$	$2957,4 / 1630 / 0,422$	$0,03\text{--}35^\circ$
Крейсер «Варяг»-58	$134_{+9} / 15,2_{+0,9} / 4,5$	$4460,3 / 2081,4 / 0,487$	$-0,76\text{--rad}$
«Стерегущий» - 61	$133_{+11} / 14_{+1,8} / 4,47$	$4319,6 / 2047,4 / 0,515$	$0,2\text{--}31^\circ$
«Буревестник»-1135	$113_{+10} / 13,2_{+1} / 4,2_{+2,68}$	$2915,1 / 1609,7 / 0,487$	$-0,34\text{--rad}$
5415 US Navy	$142_{+11} / 19,1_{+1,4} / 6,15_{+3,02}$	$8418 / 2975,6 / 0,507$	$-1,00\text{--rad}$
ONR-5613 (DDX)	$154_{+2} / 18,8 / 5,49_{+2,1}$	$8524,4 / 3197,4 / 0,536$	$-0,88\text{--rad}$
«Азербайджан»	$140_{+16} / 22 / 5,89$	$10261 / 3021,3 / 0,566$	$-,15$

L – длина корпуса по ватерлинии + добавка до максимальной

[м]

B – ширина по ватерлинии + добавка до максимальной

[м]

T – расчетная осадка

[м]

W – водоизмещение на тихой воде

[м³]

S – площадь смоченной обшивки

[м²]

δ – коэффициент общей полноты

[δ]

Δh – максимум по S-образной диаграмме по углу крена, или

– отсчёт плеча остойчивости по углу крена в 1 ~ рад (h)

[м]

(?? 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, с визуальными наблюдениями по мере возможности сопоставления результатов при сопоставимом разгоне, скорости хода и поддержании курса в условиях синхронных и соизмеримых по величинам углах рыскания.

Из ранее проведённых опытов следует заключение о сопоставимости результатов вычислительных экспериментов в течение 10÷15 минут реального времени, после чего маршруты движения относительно гребней волн заметно различаются.

Для всех числовых моделей кораблей и судов первые опыты выполняются с нулевой метацентрической высотой, что крайне важно для оценок качества про-

ектирования обводов и формы корпуса корабля в целом. В отличие от тихой воды, в условиях морского волнения обретается некий полезный запас остойчивости, который слабо проявляется в гидростатике на тихой воде.

Минимальной скоростью штормового хода в испытаниях устанавливается 9 узлов, при которой корабль безударно и без слеминга маневрирует в условиях интенсивного волнения. Номинальный и полный ход выбирается по экстремумам волнового сопротивления, и по возможности проверяется режим движения с максимальным волнообразованием на скорости по Фруду $Fn \approx 0,5$, и на скорости хода $Fn \approx 0,8$ с поперечной корабельной волной значительно большей длины корпуса корабля.

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

Таблица.

Выбор скорости хода корабля по условиям корабельного волнообразования.

Имя	9 узл. → Fn	Скорость по Фруду Fn → в узлы							L_{KWL}
		$0,22_{min}$	$0,24^{max}$	$0,26_{min}$	$0,3^{max}$	$0,33_{min}$	$0,48^{max}$	$0,8$	
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
CPTM-К пр.502-ЭМ	$0,204$	9,69	10,57	11,46	13,22	14,54	21,15	35,25	52,4
Лидер «Ташкент» + Крейсер «Варяг» – 58	$0,128$	15,5	16,91	18,32	21,14	23,25	33,82	56,37	134
«Стрекущий» – 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
«Азербайджан»	$0,125$	15,84	17,28	18,72	21,6	23,77	34,57	57,61	140
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.

Первая серия экспериментов с крейсером «Аврора» (с нулевой метацентрической высотой = опрокидывается) с метацентрической высотой 5% от ширины корпуса, на скоростях хода: 9 узлов, 17,62 узла, 32,54 узлов и 54,22 узла в

трёх вариантах предельно интенсивного волнения $\lambda = 0,75 \cdot L$, $\lambda = 1,0 \cdot L$ и $\lambda = 1,5 \cdot L$ на курсе навстречу первой структуре волн зыби – вразрез свежей штормовой волне.

Всего три группы в сериях по четыре эксперимента для различных скоростей хода на одинаковой волне (? или *четыре группы с равными скоростями хода для различной интенсивности волнения, или и то и другое ?*).

+++ неплохо бы поэкспериментировать ещё и с различными моделями морского волнения и упрощенными моделями корабельной гидромеханики, тоже, – скорее всего результаты и здесь будут вполне сопоставимыми, и тогда для оценочных экспериментов станет возможным ограничиваться совсем уж простыми и быстрыми расчётами...

Мореходные вычислительные эксперименты: «Аврора», Корвет-1201, «Буревестник» и «Углекаменск»

Первый вычислительный эксперимент проводится для предельно опасного волнения с длиной прогрессивной трохоидальной волны равной $\lambda = L$ длине корпуса корабля, при максимальных высотах и встречной скоростью потока в гребне обрушающейся волны.

(...уточнить...)

В таких условиях единственно возможный и безопасный курс это штормование строго носом на волну предельно малыми ходами, достаточными лишь для удержания заданного курса. В этой серии экспериментов устанавливается скорость хода, соответствующая ровно 9 узлам на тихой воде. Корабль во взаимодействии со встречными волнами может терять скорость движения вперед, что будет означать потерю управляемости, и для возврата корабля на заданный курс будет требоваться увеличение тяги главных двигателей.

Корвет-1201 – корабль гидрографической и патрульной службы

Специальная отработка обводов Корвета-А1201 выполнялась по наставлениям и в ограничениях технического задания капитана I-ранга Сергея Ивановича

Кроленко, преподавателя кораблестроительного отделения Ленинградского Высшего военно-морского инженерного училища²¹.

Штормовые условия для корабля среднего водоизмещения никак не ограничиваются крутизной и высотой океанской волны. Океанское плавание и несение службы на экстремально интенсивном волнении вполне естественно для корабля гидрографической и патрульной службы среднего водоизмещения. К тому же, успешное выполнение походных заданий под ураганными ветрами, на толчее внутри тайфунов и под ударами кноидальных гребней мелководья представляются обязательными и важнейшими требованиями к предназначению такого корабля.

Как ожидалось, подтверждаются удовлетворительные показатели штурмования и поддержания ходкости корвета на курсе носом на волну.

Характеристики волнения в вычислительном эксперименте:

Волна: $\lambda = 90$ м, $\tau = 7.6''$, $\zeta = 10.73$ м, $\alpha = 1.00$, $C = 11.9$ м/с, $A = 180^\circ$,

Зыбь: 158 м, 10.0'', 7.52 м, =0.40, 15.7 м/с, 214°,

Вал: 225 м, 12.0'', 5.37 м, =0.20, 18.7 м/с, 146°.

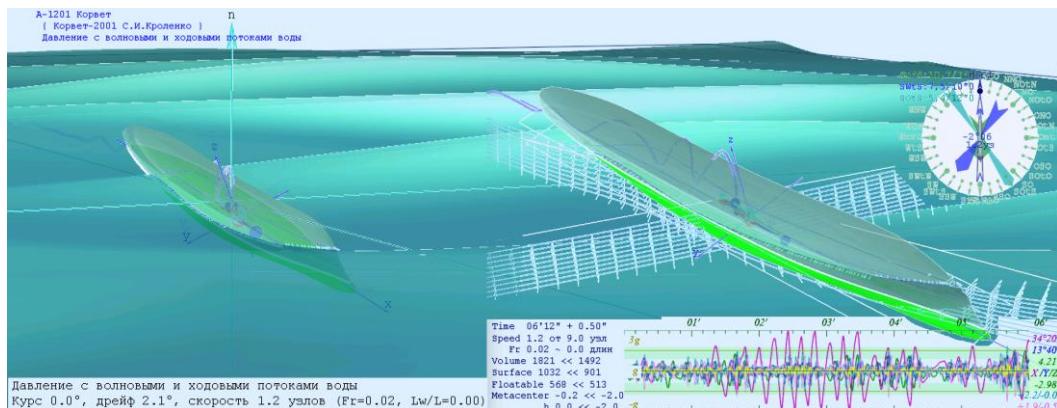


Рис. 34. Корвет-1201 на штурмовом курсе носом на волну. Метацентрическая высота $h = 0$.

Свежая зыбь и пологие волны от далёких штормов в проводимом вычислительном эксперименте устанавливаются весьма высокими, однако они не привносят ударных скоростных нагрузок при отражении от корпуса корабля, внешне вос-

²¹ Высшее военно-морского инженерное училище имени Феликса Эдмундовича Дзержинского учреждено в 1798 году Императором Павлом-І в качестве Училища корабельной архитектуры.

создавая лишь заведомо нерегулярный характер морского волнения, что отображается в графическом окне (Рис. 34) морского волнения.

В протоколе эксперимента отмечено, что максимальное рыскание на курсе $\chi = +27^\circ 5$ на правый борт отмечается по времени $T = 9\text{мин}30\text{сек}$, в этот момент максимальный угол крена достигает $\vartheta = 48^\circ 1$ на правый борт, максимальный дифферент $\psi = 11^\circ 4$ на нос, потеря хода до обратного $\xi = -0,9$ узла. Здесь экстремально крупная волна накатилась на носовую палубу в момент схода корпуса с предыдущего гребня, возникла потенциальная опасность быстрого приведением корпуса лагом к волне. В случае режима хода более 9 узлов, корабль мог глубже занырнуть под волну, и опасный сценарий вполне мог осуществиться. Однако, учитывая абсолютный запас остойчивости Корвета, он вероятнее всего мог лишь сильно отклониться от курса с большим креном на правый борт.

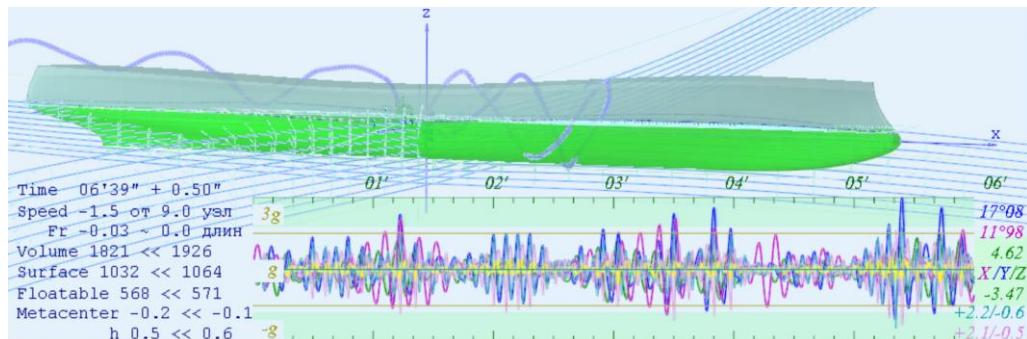


Рис. 35. Корвет на штормовом курсе носом на волну. Метацентрическая высота $h = 0,5$ м.

Полная потеря хода в процессе вычислительного эксперимента возникает вполне регулярно, так:

$T = 06'20"$: $\xi = -1.5$ узла, и через четыре секунды крен возрастает с нуля до $\vartheta = 14^\circ 9$ на правый борт;

$T = 07'04"$: $\xi = -1.7$ узла, причиной чему является дифферент на корму за шесть секунд до столь существенной потери хода, при этом экстремального крена не возникает: $\vartheta = +8^\circ 2$;

$T = 09'53"$, откат хода до $\xi = -1.6$, что связано с медленным набором скорости в процессе возврата с курса вразрез волне к штормованию носом на волну.

В эксперименте на курсе вразрез волне, в столь тяжелых штормовых условиях Корвет начинает плавно раскачиваться по 25° на каждый борт с периодом порядка 13 секунд, и не успев набрать ход, становится лагом к волне, и под нарастающими ударами волн через две минуты опрокидывается.

Увеличение начальной остойчивости, в данном случае до 5% от ширины корпуса: $h = +0,5$ м значительно снижает размах бортовой качки, при которой максимальные углы крена ограничиваются $\theta = \pm 12^\circ$ градусами, при экстремумах по дифференту достигающими $\psi = +17^\circ$ градусов на нос и $\psi = -12^\circ$ градусов на корму. При положительной остойчивости $h = +0,5$ м частота бортовой качки почти удваивается до периода собственных колебаний корпуса порядка $\tau \approx 5'' \div 6''$ секунд, что фактически становится соизмеримо темпу волновых воздействий, вместо $\tau \approx 10''$ секунд собственных бортовых колебаний корпуса при нулевой начальной остойчивости.

На момент времени $T = 09'24''$ регистрируется максимальное рыскание с отклонением от курса на $\chi = -10^\circ 7$, при этом крен на левый борт столь же велик: $\theta = -30^\circ 8$, но с более резкими проявлениями. Адекватное сопоставление условий обитаемости по ускорениям на борту корабля в моменты времени максимального крена и рыскания затруднительны, и нуждаются в дополнительных изысканиях. Так, без положительной остойчивости регистрируется умеренное ускорение в оконечностях порядка $g \times -1,49$ по корме и $g \times -1,35$ по носу, при относительно сносных условиях обитания в средней части корпуса не более $g \times -0,36$ за всё время вычислительного эксперимента. В варианте с положительной остойчивостью $h = B \times 5\% = 0,5$ м, ускорение в оконечностях возрастает до $g \times +2,32$ по корме и $g \times -3,18$ по носу, при усилении ускорений в средней части корпуса до $g \times +0,6$ [м/с²].

Корпус Корвета-1201 в средней части обладает максимальным завалом борта на уровне действующей ватерлинии, что соответствует точке перегиба на шпангоутных контурах. Такие обводы придают кораблю гидростатические качества с проявлением положительной остойчивости при любом изменении углов крена или действующей осадки в условиях вертикальной качки на волнении.

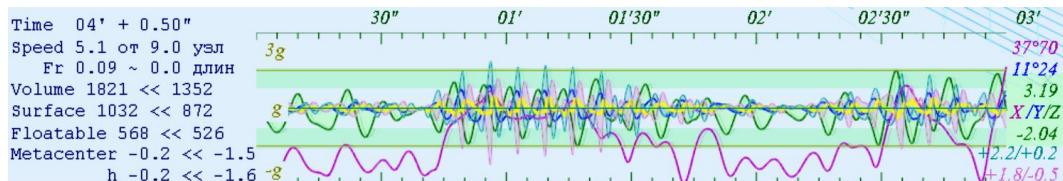


Рис. 36. Корвет без положительной остойчивости. Метацентрическая высота $h = -0,25$ м. На интенсивном волнении корабль спрямляется, при ослаблении внешних воздействий корабль лишь отчасти кренится по усредненной диаграмме остойчивости.

Для проверки безусловной остойчивости корпуса в специальном эксперименте Корвету придаётся отрицательная начальная остойчивость с метацентрической высотой: $h = -0,25$ м, при которой устанавливается статический крен на тихой воде около: $\theta \approx -30^\circ$. На графиках состояния корабля (Рис. 36) отмечается плавная качка вблизи величины статического крена, попеременно на правом и левом борту, что случается при ослаблении внешнего штормового воздействия. При усилении интенсивности волнения, внутри волновых структур, Корвет выравнивается на ровном киле, показывая положительные особенности улучшенных обводов корпуса в условиях интенсивного морского волнения. Весьма полезное и важное качество корпуса в обосновании безопасности и эффективности штормового плавания без особой оглядки на текущее состояние гидростатических параметров корабля.

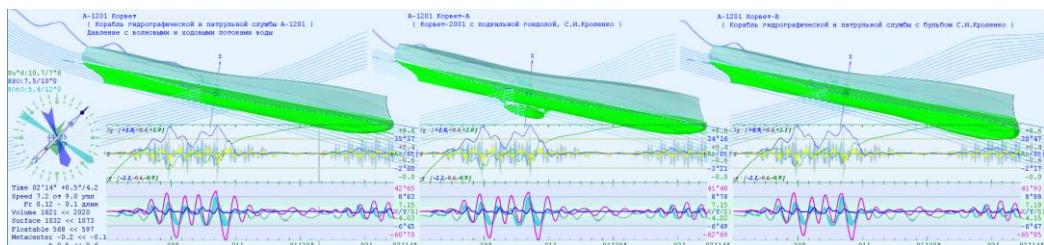


Рис. 37. Три варианта корабельных обводов для Корвета-1201: со штормовым подрезом форштевня – слева; с подкильной гондолой – в средине; с носовым бульбом – справа.

Дополнительные вычислительные эксперименты проводились в режиме синхронных испытаний Корвета-1201 в вариантах со штормовым подрезом форштевня, с опускаемой под днищем гондолой и носовым бульбом гидроакустической станции (Рис. 37). Для усиления внешних волновых воздействий использовалось ослабление эффекта отрицательных давлений $K_V=0$ для компенсирующего гидродинамического парадокса Даламбера.

Существенных различий в мореходных качествах трёх кораблей, позволяющих систематизировать конкретные предложения для наставлений мореплавателям, пока не выявлено.

...

Крейсер I-ранга «Аврора» Тихого океана

Крейсер «Аврора» имеет внешне округлые шпангоуты в средней части корпуса, с их заметным спрямлением в оконечностях, что характерно для его клиперской носовой скулы. Если у Корвета-1201 угол закат диаграммы статической остойчивости отсутствует, то для «Авроры» при нулевой метацентрической высоте такой угол потери остойчивости отмечается при крене порядка: $\vartheta \approx 100^\circ$, а при характерной для крейсера начальной остойчивости $h \approx 80$ см угол заката пропадает. В целом гидростатика «Авроры» прекрасно сбалансирована, на зависть многим современным кораблям и судам, вынужденным искусственно завышать величину метацентрической высоты для достижения аналогичного или меньшего запаса остойчивости.

Крейсер «Аврора» также обладает свойством обретения остойчивости при любом изменении осадки, хотя и не столь явным проявлением, как у Корвета.

Усредняя и спрямляя жгут диаграмм остойчивости для разных осадок получается интегральная метацентрическая высота для «Авроры» порядка $h \approx 10$ см, которая в пропорциях по ширине Корвета составит $h \approx 6$ см, что значительно меньше его $h \approx 15$ см. На совсем больших углах крена условная остойчивость «Авроры» достигает $h \approx 40$ см, что геометрически соизмеримо в оценках $h \approx 25$ см для Корвета-1201.

Соответственно, в лучшие качества мореходные «Авроры» в отличие от Корвета, бортовая качка крейсера прогнозируется плавной, и, предположительно, с меньшим размахом по углам крена. Все положительные свойства обводов корпуса «Авроры» присутствуют, но проявляются ослабленно, что в штормовом плавании способствует комфортным условиям обитания экипажа, с постоянной готовностью к проведению морских операций по предназначению корабля.

В отношение к «Авроре» не совсем верны безапелляционные суждения об эффективности и надежности корабля в штормовом море, в отличие от специально отработанного для штормового маневрирования Корвета-1201. Нулевая метацентрическая высота крейсера может быть недостаточной, и не свидетельствует о минимально необходим запасе поперечной остойчивости, в чем «Аврора» также несколько уступает в качестве целенаправленной отработки обводов Корвета-1201.

Рассмотрим особенности штормования крейсера на курсе носом на волну по результатам прямых вычислительных экспериментов. Условия в штормовом море аналогичны испытаниям корвета, с параметрами волнения пропорционально

увеличенными относительно размеров корабля (высота ветровой волны возрастает с $\zeta = 10.73$ до $\zeta = 14.75$ м), начальная гидростатическая остойчивость снова нулевая $h = 0$:

Волна: $\lambda=124$ м, $\tau=8.9''$, $\zeta=14.75$ м, $\alpha=1.00$, $C=13.9$ м/с, $A=180^\circ$,

Зыбы: 216 м, 11.8'', 10.34 м, =0.40, 18.4 м/с, 214°,

Вал: 309 м, 14.1'', 7.38 м, =0.20, 22.0 м/с, 146°.

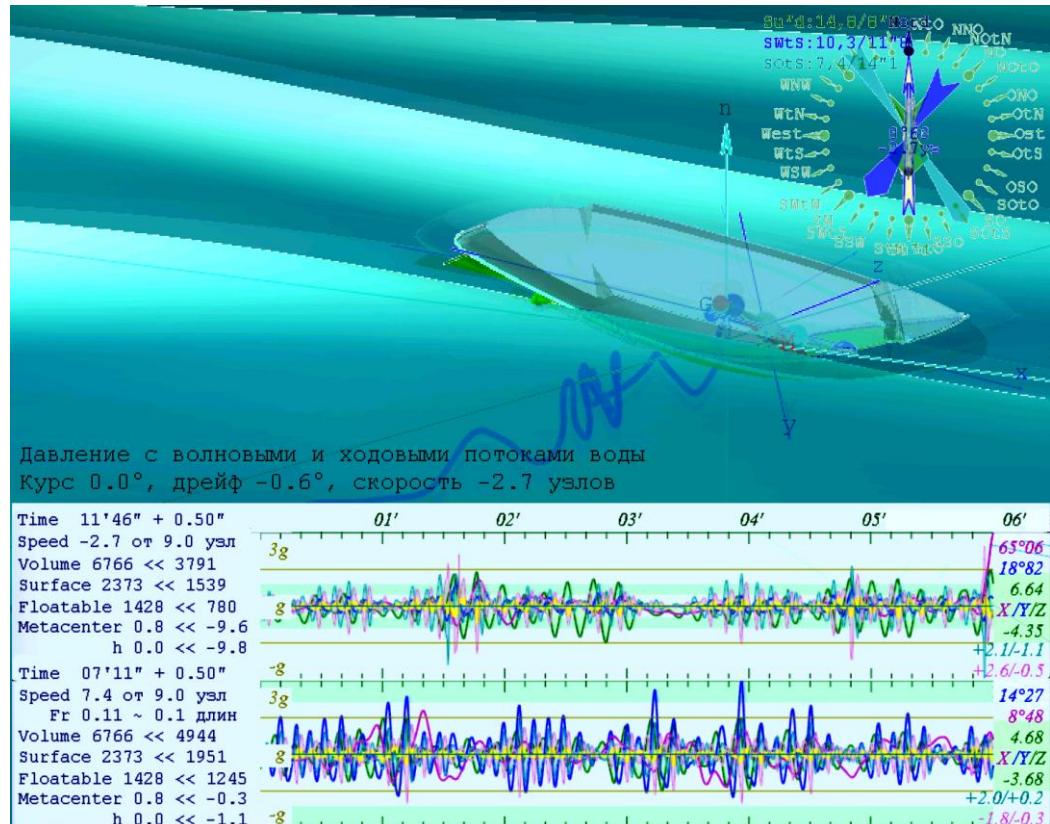


Рис. 38. Критический момент штормования носом на волну для крейсера «Аврора». В момент подъёма корпуса над впадиной между гребнями волн, крен на правый борт достигает 65° без усиленной килевой качки и заметного рыскания на курсе.

Как и ожидалось, крейсер «Аврора» (Рис. 38) поначалу прекрасно идёт на встречу предельно крупному свежему ветровому волнению ($\lambda = 124$ м, $\tau = 8''9$, $\zeta = 14.75$ м, $C = 13.9$ м/с) углы крена не превышали $9 \approx 7^\circ \div 8^\circ$ градусов, килевая качка достигала $\psi = 14^\circ 5$ градусов на нос и порядка $\psi = -8^\circ 5$ на корму, что, видимо, отвечает различию в полноте носовых и кормовых шпангоутов.

Первая сильная раскачка крейсера проявилась на момент времени: $T = 07'22''$ с креном на левый борт $\vartheta = -17^\circ 3$, что произошло после достижения предельно большого дифферента $\psi = +18^\circ 8$ на нос, при этом отмечается быстрая потеря хода с положительной до обратной $\xi = -0,8$ узлов, и затем до $\xi = -1,4$ узла.

Через 11 секунд, $T = 07'33''$ «Аврора» уже кренится на правый борт с углом $\vartheta = +22^\circ 8$ градусов, при этом тяги машин не хватает для возобновления хода вперед, скорость повторно теряется до еще большей обратной величины $\pm \xi = -1,9$ узлов, и еще через 14 секунд при $T = 07'47''$ следует последний отклик по крену порядка $\vartheta = -16^\circ 1$. Максимальное рыскание отмечено в $T = 07'26''$ с отклонением от курса $\chi = +6^\circ$ вправо.

Затем качка и устойчивость на курсе у крейсера «Аврора» стабилизируются, и лишь на одно мгновение авторулевой поправляет курс влево в момент времени $T = 09'40''$ при рыскании на величину $\chi = +5^\circ 7$ вправо.

В момент времени $T = 11'41''$ нос «Авроры» поднимается с дифферентом $\psi = -12^\circ 7$ градусов, с полной потерей хода, и через шесть секунд корабль отбрасывает назад на скорости $\xi = -3,9$ узлов, с образованием катастрофического крена $\vartheta = +65^\circ 6$ на правый борт, и пока без рыскания на исходном курсе (Рис. 38).

К моменту времени $T = 11'53''$ корабль на крутом склоне набегающей волны несётся задним ходом со скоростью $\xi = -4,5$ узлов, и находится в фазе максимального всплытия по вертикальной качке на высоту $\int = +8,9$ м, при нарастающем уровне моря всего лишь до $\zeta = +2,9$ м. В состоянии максимального отрыва от поверхности воды происходит быстрый уход с курса влево на величину $\chi = -51^\circ$, и при максимальной скорости бортовой качки крен на мгновение выравнивается как раз в момент встречи – максимального угла склона приближающегося гребня девятого вала. Происходит жесткий захват корпуса быстрой прогрессивной троходальной волной, или своеобразный броунинг на заднем ходу по волне. Перекладка руля вправо на восстановление курса может только усугубить аварийную ситуацию, но вряд ли какой рулевой будет успевать реагировать на быстрое стремление корабля к катастрофе.

Через пять секунд $T = 11'58''$ в районе миделя крейсера образуется гребень волны с высотой $\zeta = +6,5$ м в быстро спадающей фазе вертикальной качки, то есть в момент захвата корабля гребнем волны происходит быстрое накренение до величины $\vartheta = -82^\circ 2$ на левый борт, что означает реальную опасность гибели корабля.

Затем носовая часть «Авроры» сваливается во впадину, и на момент времени ровно $T = 12'$ рыскание переходит с левого на правый борт, останавливаясь через четыре секунды с отклонением от курса на $\chi = +22^\circ 6$ правого борта, и в тому

же моменту корабль выравнивается по крену, и таким образом полностью завершают катастрофический процесс к моменту времени $T = 12'10''$, при умеренном крене на правый борт $\theta = +17^\circ 7'$. «Аврора» снова плавно набирает ход вперёд с обретением управляемости под действием авторулевого, и в режиме «влево помалу» корабль возвращается на заданный курс, а дальнейшее движение как и прежде хорошо стабилизируется.

На момент времени $T = 14'11''$ волнение вовлекает корабль движение назад в течение $37''$ секунд, при этом скорость обратного дельфинирования возрастает до $\xi = -5.3$ узлов, что в принципе чрезвычайно опасно.

В проводимом эксперименте, поначалу углы рыскания на курсе не превышают $\chi = \pm 5^\circ$ градусов, с размахом бортовой качки в пределах $\theta = +7^\circ$ градусов.

Даже по подробному протоколу вычислительного эксперимента непросто опознать причину захвата корпуса «Авроры» гребнем волн на курсе штормования носом на волну. Для вывода корабля из захвата волной необходимо добавлять обороты винтов (тягу движителей), вплоть до аварийного форсирования главных машин – известного в реальной морской практике. Однако для быстрого принятия таких решений необходимо время и адекватная оценка обстановки на море, с чем большие сложности при плохой видимости в шторм и в ночной темноте.

Для большого корабля столь огромный размах качки и рыскания более $\chi > \pm 70^\circ$ всего за $\tau = 5'' (\times 2)$ секунд, означает огромные ускорения и нагрузки на борту корабля. Период качки порядка $\tau = 10''$ секунд вполне естественен при волновых воздействиях с интервалом в десять секунд со стороны свежих и предельно крутых волн. Максимальные ускорения в оконечностях слишком велики, порядка: $-1,59 \times g$ - по носу, $-1,8 \times g$ [м/с²] - по корме, то есть, все незакрепленные грузы будут приподняты в невесомости и сброшены на внутренние переборки или на палубу.

Явно завышенные ускорения являются следствием больших надводных объёмов в оконечностях крейсера. В средней части корабля вертикальные ускорения вполне умеренные, максимум до $+0,39 \times g$ [м/с²], что формально не нарушить работу кочегаров в котельных отделениях. Регистрируется значительный размах вертикальной качки с подъёмом средней части корабля до высоты $z = +8,9$ м, в этот момент времени уровень в гребне волны непосредственно под кораблём поднимается только до $\xi = +6,5$ м.

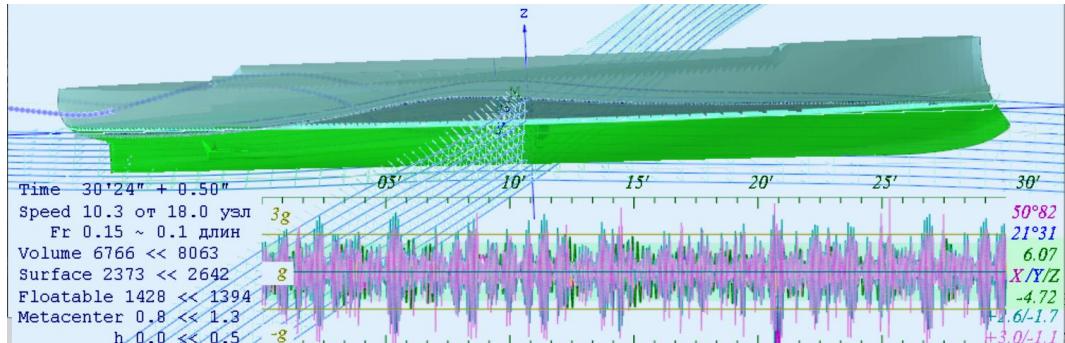


Рис. 39. Штормование крейсера «Аврора» носом на волну полным ходом.

Крейсер «Аврора» при штормовании может держать полный ход (Рис. 39), с тягой движителей по скорости на тихой воде 18 узлов. Рассмотрим без подробностей особенности штормового хода навстречу свежей волне. Все условия испытаний такие же, как и в предыдущем эксперименте.

Как это обычно принято в морской практике крупных кораблей, в вычислительном эксперименте не задействуется интерактивное или динамическое управление тягой движителей. Экспериментатор не всегда обладает достаточным опытом хорошей морской практики, а на ходовом мостике корабля не бывает столь же полного набора параметров по текущему состоянию корабля с прогнозами силового воздействия штормового моря, особо ночью или при плохой видимости.

Новый прямой вычислительный эксперимент лишь на двадцатой минуте, показывает потерю скорости до -1 узла, до малого заднего хода. Единожды регистрируется угол крена 50° градусов без больших осложнений с рысканием на курсе или захватами корпуса гребнями волн. То есть, крейсер вполне уверенно и устойчиво идет полным ходом навстречу штормовой волне, с максимальными ускорениями в конечностях порядка ускорения свободного падения, однако в моменты экстремальной качки обитаемость на борту корабля значительно ухудшается: $g \times -2,07$ по носу, $g \times -2,49$ по корме и $g \times +0,66$ [m/c^2] – в средней части корпуса.

Усреднённая скорость немного превышает 10 узлов, то есть в целом потери хода меньше, чем в эксперименте на малом ходу, опасность захвата и опрокидывания корабля гребнем девятого вала также оценивается несколько меньшей.

Но всё же, под ударными нагрузками гребней штормовых трохоидальных волн, командиру корабля будет затруднительно обосновывать решения по увеличению скорости хода на встречную волну с высотой более 14 метров.

При отклонении от курса носом на волну на 2-3 румба, возникает опасность опрокидывания корабля при первом же прохождении вблизи центра групповой структуры трохоидальных волн. При небольшом снижения центра тяжести корабля для получения положительной начальной остойчивости, опасность опрокидывания корабля значительно снижается.

«Углекаменск» - средний рыболовный траулер морозильный, кормового трааления

В морской практике штормовые качества корабля могут проявляться значительно более сложными, и порой непредсказуемыми процессами с тяжкими последствиями. Так, увеличение штормового хода навстречу волне для ширококорпусного рыболовного траулера быстро проявляет опасность маневрирования среди крутых волн, в отличие от вполне удовлетворительных результатов вычислительных экспериментов с высокой скоростью хода крейсера «Аврора».

Кратко представим вариант штормования носом на волну рыболовного траулера «Углекаменск» (проект 502-ЭМ типа «Василий Яковенко»). Как отмечено в таблице выше, осреднённая остойчивость траулера при нулевой начальной метацентрической высоте составляет порядка 15 см с углом максимума по крену около 48°.

Для корпуса с широкой транцевой кормой такие оценки могут быть обманчивыми, и в практическом равнообъёмном креновании для расчётов диаграмм остойчивости необходимо учитывать сопутствующее изменение дифферента, которое естественным образом моделируется в комплексе «Aurora», где проявление S-образности диаграмм остойчивости для «Углекаменска» подтверждается крайне слабым.

Возможно иначе, так как один сантиметр плеча остойчивости S-образной диаграммы траулера проявляется только при крене в 15°, отчего при выходе из положения равновесия трудно удержать крен на больших углах, когда в уточненных пространственных вычислениях затапливается главная палуба траулера (в комплексе «Hull» уровень верхней палубы поднимается до высоты фальшбортов). При минимальной начальной остойчивости, в эксперименте по достижению крена в 15° градусов, траулер продолжает накренение и опрокидывается в динамике по причине возрастания угловой скорости.

Условия морского волнения устанавливаются по аналогии с предыдущими мореходными вычислительными экспериментами:

Волна: $\lambda = 52$ м, $\tau = 5.8''$, $\zeta = 6.25$ м, $\alpha = 1.00$, $C = 9.0$ м/с, $A = 180^\circ$;

Зыбь: 92 м, 7.7'', 4.38 м, 0.40, 12.0 м/с, 214°;

Вал: 131 м, 9.2'', 3.13 м, 0.20, 14.3 м/с, 146°.

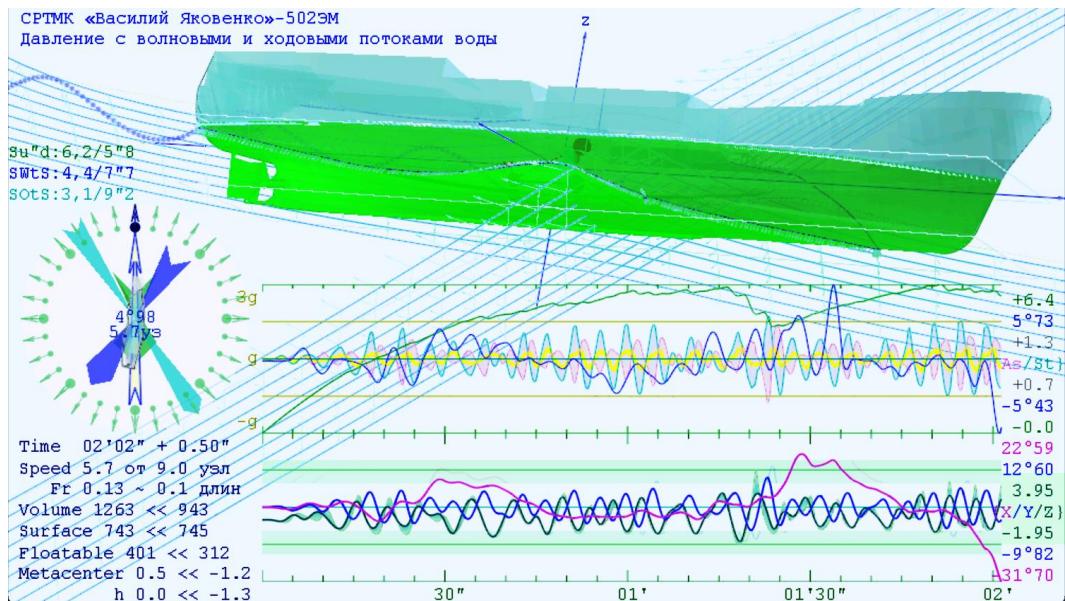


Рис. 40. Траулер «Углекаменск» обладает очень малым запасом остойчивости при нулевой метацентрической высоте. Интегрирование осреднённого пучка диаграмм остойчивости с волновыми воздействиями приводит к апериодической бортовой качке, и создаёт надежду успешного штурмования носом на волну при умелых действиях рулевого и вахтенного штурмана. На второй минуте вычислительного эксперимента, после троёкратного погружения корпуса ниже гребня волны и заливании открытой главной палубы в носовой оконечности, малый запас остойчивости и весьма высокая скорость встречи с гребнями встречных штурмовых волн приводят судно к опрокидыванию через левый борт.

Первый опыт с траулером проводился при нулевой начальной остойчивости. В отличие от крейсера «Аврора», для которого всегда возникает положительная остойчивость при любом изменении крена или осадки, у траулера S-образность диаграммы Рида нивелируется отрицательной остойчивостью при небольшом подвсплытии корпуса под действием вертикальной качки. Малая начальная остойчивость сразу отмечается апериодической бортовой качкой (Рис. 40), с проявлением видимого периода порядка одной минуты. На момент

времени 1'20" минут скорость хода достигает 6,4 узлов, и траулер с гребня волны с большой скоростью скатывается под новую встречную волну с дифферентом 12°6 на нос. В результате зачерпывания на палубу большого объёма воды, уровень моря в гребне волны на два метра превышает посадку корпуса на тихой воде, главная палуба в носовой части судна погружается ниже уровня моря порядка одного метра. Через 7" секунд возникает крен на правый борт 22°6 градуса.

Траулер почти не теряет ход, и на второй минуте штормования снова разгоняется до 6,4 узлов курсом носом на волну, под воздействием вертикальной качки троекратно главная палуба погружается ниже уровня моря, от этого траулер неумолимо кренится на левый борта, где задерживается толстый слой забортной воды и траулер опрокидывается.

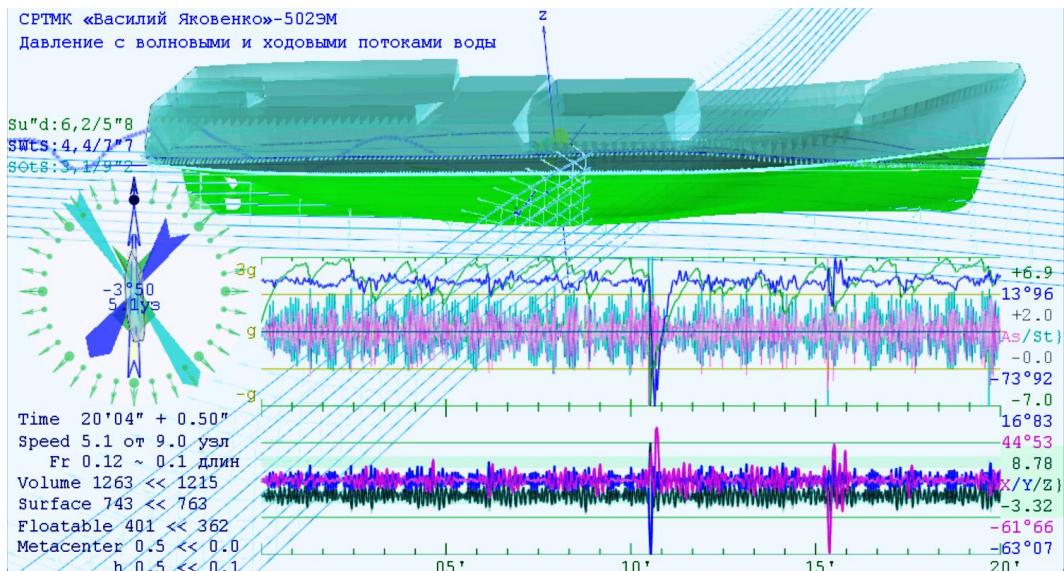


Рис. 41. Вполне успешное штормование траулера «Углекаменск» при небольшой положительной начальной метацентрической высоте $h = 49$ см, полным ходом 9 узлов носом на волну. Очень показательны процессы ходкости и качки при удержании заданного курса в условиях нерегулярного морского волнения, в данном случае на трех групповых структурах штормовых волн. В реальности траулер в аналогичных условиях держит малый ход, отчего килевая качка становится плавной, а параметрический резонанс по углам крена уменьшается пропорционально ходкости.

Второй вычислительный эксперимент со штормованием носом на волну при метацентрической высоте в 5% от ширины корпуса: $h = B \times 5\% = 49$ см. В таком варианте траулер поддерживает осредненный ход порядка 4,7 узла при регу-

лярных максимумах до 6,9 узлов от заданных по условиям ходкости на тихой воде 9 узлов.

За двадцать минут штормового маневрирования судно дважды испытывает сильное воздействие гребней штормовых волн на 10'-й и 15'-й минутах, с креном порядка 45° градусов правого борта в первом случае, и порядка -62° градусов левого борта во втором случае. Безусловно, это два опасных эксцесса, возникших по причине слишком высокой скорости движения судна навстречу крутой волне, вследствие которой возникает чрезмерная килевая качка, и сопутствующие жесткие захваты корпуса гребнями штормовых волн явлениями дельфинирования, рыскания и быстрой потере хода и управляемости.

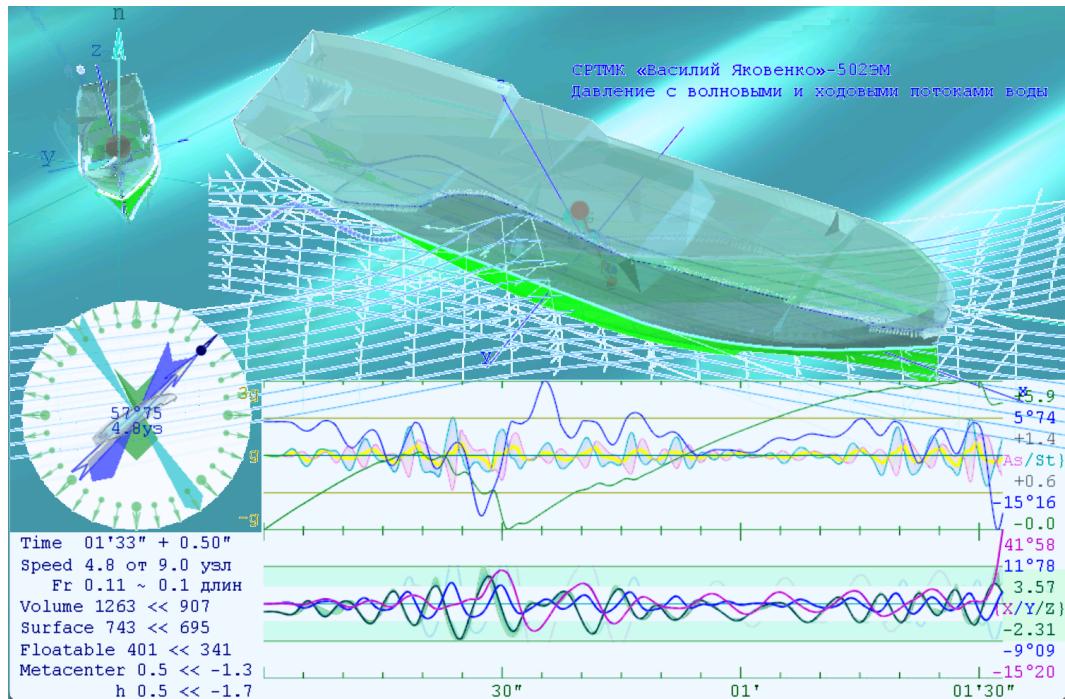


Рис. 42. На курсе вразрез свежей ветровой волне траулер дважды захватывается встречной волной, каждый раз при сильном рыскании под волну теряется ход. Вторая встреча с гребнем волны через полторы минуты штормового хода заканчивается сильным зачерпыванием воды на верхнюю главной палубы, и опрокидыванию через правый борт.

В реальной морской практике судоводитель вынужденно поддерживает значительно меньший ход, подбирая скорость на грани возможности удержания судна на заданном курсе. Увеличение скорости хода в вычислительном эксперименте сразу показывает усиление дифферента с опасным взлётом носовой оконеч-

ности траулера над волной, что принципиально не может и не должно допускаться при штормовании судна на море.

Для траулера скорость в 9 узлов ближе к полному ходу. Безопасное штормование носом на крутую волну должно проходить исключительно малыми ходами, при которых средне-интегральное продвижение с дрейфом сводится к малому ходу назад, со своеобразным кормовым дельфинированием в сторону распространения гребней и волновых склонов

В случае навигационных опасностей в направлении штормового дрейфа, где могут быть отмели или прибрежные скалы, кораблю желательно иметь возможность движения вперёд по выбранному курсу, для чего обычно назначается ход вразрез волне, где сильная килевая и вертикальная качка трансформируются в рыхление на курсе, и потому потери хода уже не столь существенны.

Возможен и допустим ли для среднего траулера (Рис. 42) такой активный штормовой ход вразрез соизмеримой с длиной корпуса и предельно крутой волне? Нет.

В морской практике автора случалась попытка такого маневрирования с продвижением вперёд на север на курсах вразрез волне в Тихом океане недалеко от выхода из Сангарского пролива. Необходимо было догнать другое судно с постом из Владивостока, штормовавшее вразрез волне с медленным удалением в сторону открытого океана. Траулер легко встает на курс вразрез волне, а для возврата на курс носом на волну уже потребуется увеличивать тягу на гребных винтах. После выхода на курс с последующим набором хода, не сразу, но при встрече с гребнем крупной волны случается сильнейший удар в борт по носовой скуле. Тогда вынужденно приходится выходить на безопасный курс носом на волну, и возвращаться к режиму штормования предельно малыми ходами. Это означает возобновление практического дрейфа обратно на юг, или иначе – кормой назад по склонам волн с минимально необходимой тягой машин для удержания штормового курса на север, навстречу волн.

Сторожевой корабль «Буревестник»

Для корпуса «Буревестника» не выполняются условия возникновения положительной остойчивости при любом изменении крена или посадки, и потому испытания с нулевой остойчивостью в принципе невозможны. На тихой воде корабль ещё как-то держится не опрокидываясь с собственным периодом бортовой

качки порядка $\tau \approx 26$ сек, но при любом слабом воздействии тут же опрокидывается, устремляется в позицию оверкиль.

Для построения штормового вычислительного эксперимента принимаем величину начальной метацентрической высоты $h = B \times 5\%$ от ширины корпуса по конструктивной ватерлинии, что составляет $h = 0,71$ м. Предварительные опыты показывали, что при большей метацентрической высоте качка становится настолько резкой, что неожиданная опасность и непредсказуемость момента опрокидывания корабля только возрастает.

Режим волнения по аналогии определяется геометрическими размерениями относительно длины корабля по ватерлинии и углами склона прогрессивных трохоидальных волн:

Волна: $\lambda=123$ м, $\tau = 8.9''$, $\zeta=14.66$ м, $\alpha=1.00$, $C=13.9$ м/с, $A=180^\circ$,

Зыбь: 215 м, 11.7'', 10.27 м, =0.40, 18.3 м/с, 214°,

Вал: 307 м, 14.0'', 7.34 м, =0.20, 21.9 м/с, 146°.

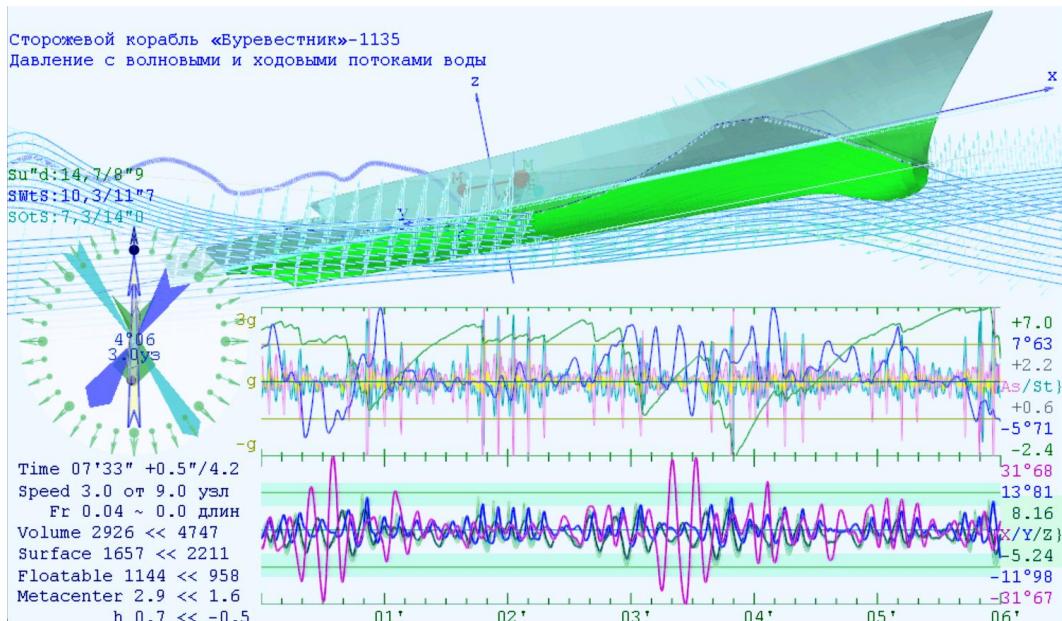


Рис. 43. Корабль на штормовом курсе носом на волну разгоняется до скорости 7 узлов. Гребень девятого вала подбрасывает нос корабля вверх, отчего возникает эффект дельфинирования назад с гребня волны со скоростью -6,3 узла.

Высота самой свежей волны, девятого вала, превышает 14 метров, что в точности соответствует пропорциям штормового волнения в предыдущих вычислительных экспериментах с траулером и всепогодными кораблями повышенной

штормовой мореходности. Снова выбирается штормовой курс навстречу свежей ветровой волне, скорость хода по условиям ходкости на тихой воде назначается в $V = 9$ узлов, хотя для «Буревестника» это тот самый необходимый малый штормовой ход.

Сразу по началу эксперимента проявляются знакомые особенности штормового плавания с необходимостью навигационного учёта значительного угла бокового дрейфа. В условиях умеренной бортовой и усиленной кильевой качки регулярно возникают ударные перегрузки в оконечностях корабля (Рис. 43), превышающие ускорение свободного падения, то есть, с регулярным подбрасыванием незакреплённых палубных грузов в свободные перелёты в невесомости. На борту корабля столь стремительные ускорения проявляется либо в результате гидродинамических ударов при вхождении развесистых надводных скул носовой оконечности в гребни быстрых встречных волн, мчащихся с фазовой скоростью 27 узлов ($13,9 \text{ м/с}$), либо при жестких ударах плоского кормового подзора о поверхность воды, которые, также как и в проводимом вычислительном эксперименте, могут усиливаться при ослаблении интенсивности скоростного потока под кормовым подзором в зоне действия гребных винтов.

На момент времени $T = 07'24''$ на миделе корабля регистрируется максимальная высота гребня встречной волны $\zeta = +14.5$ м, быстро растёт дифферент на корму до $\psi = -24^\circ 5$ градуса, и корабль полностью теряет ход. Через секунду нос корабля взлетает вверх с усилением дифферента до угла наклона поверхности волнового склона $\psi = -31^\circ 9$ градусов, одновременно переваливаясь с левого на правый борт, и разгоном заднего хода до -7 узлов. По времени на $T = 07'30''$ задний ход – дельфинирование максимально -14,9 узлов, и на этой скорости носовая палуба уходит под гребень новой встречной волны с углом дифферента на нос $\psi = +21^\circ 5$ градуса. Происходит жесткий захват носовой части корпуса встречной волной, и на момент времени $T = 07'37''$ корабль уходит с курса на $\chi = -60^\circ 9$ градусов влево и ложится на левый борт с углом крена $\vartheta = -100^\circ 7$.

На отсчёт времени $T = 07'48''$ корабль оказывается логом к волне в положении оверкиль.

По графикам динамического состояния и картине положения корабля на волне можно сделать предварительные выводы, что опасные эксцессы возникают в моменты разгона до скорости хода 7 узлов, после чего корабль взлетает над гребнем встречной волны с большим отрицательным дифферентом на корму (Рис. 43), быстро теряет ход. Затем носовая оконечность корабля быстро падает с большой высоты, и принимает на высокую верхнюю палубу весь гребень сле-

дующей штормовой волны, происходит захват корпуса уклонением от курса в положение лагом к волне, после чего в вихре высокого гребня трохоидальной волны корабль опрокидывается.

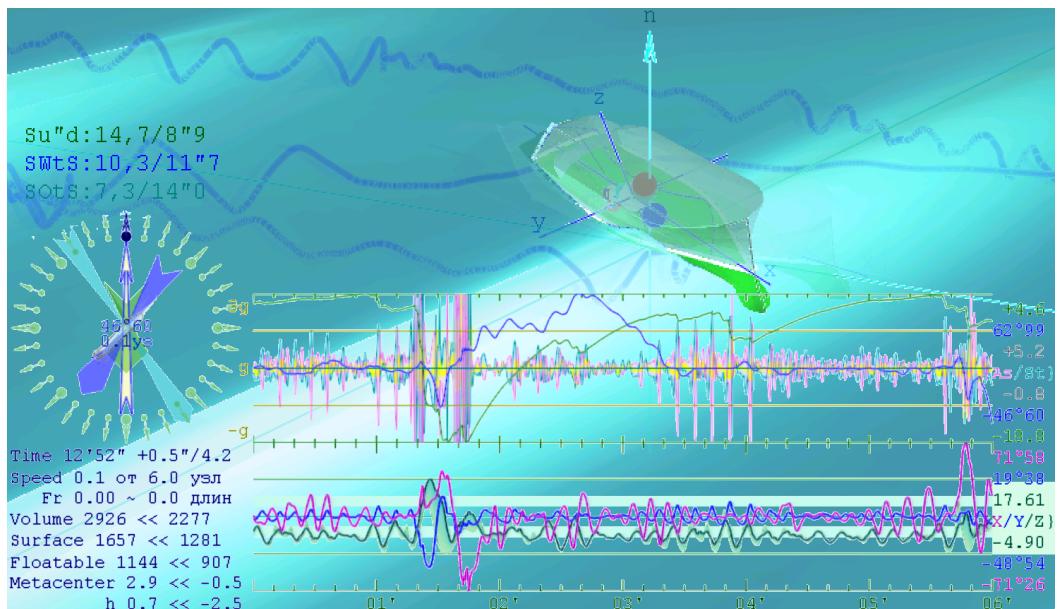


Рис. 44. Штормовой эксперимент с меньшей скоростью хода корабля. Опасность катастрофы в штормовом плавании «Буревестника» без активного маневрирования с умелым управлением ходом и курсом корабля не снижается.

Ориентируясь на хорошую морскую практику, крутую встречную волну лучше встречать с предельно малой скоростью, чтобы не возникало быстрого подбрасывания вверх развесистой носовой оконечности корабля. В случае плавного восхождения на встречную волну ожидается ослабление реакции обратного скатывания с гребня встречной волны, со снижением риска глубокого заныривания под гребень следующей трохоидальной волны в фазе интенсивной кильевой качки и рыскания.

Рассмотрим внимательнее процессы взаимовлияния качки и ходкости в динамике, и есть ли возможность избежать катастрофы при активном управлении ходом и курсом корабля. Для оценочной поверки тезиса о необходимости снижения скорости восхождения на гребень встречной волны, заново повторяется тот же вычислительный эксперимент в штормовом море со сниженной до 6 узлов заданной ходкости корабля по тихой воде.

По графикам качки не получается заметного уменьшения вертикальных ускорений в окончностях. На 8'-й минуте корабль снова скатывается со встречной волны назад со скоростью более 18 узлов, это еще не достигает режима дельфинирования при скорости набегающей прогрессивной волны в 27 узлов. Затем в течение двух минут корабля медленно возвращается на заданный курс. Бортовая качка в момент захвата корпуса волной достигает 72° градусов левого борта.

На 12'-й минуте вычислительного эксперимента корабль снова разгоняется до скорости 4,6 узлов, после чего опять случается взброс носовой оконечности вверх над гребнем волны, - повторяется захват корабля гребнем встречной волны, скорость обратного дельфинирования порядка 7,3 узлов сдерживается более быстрым сваливанием корабля на курс лагом к волне, в результате чего корабль опрокидывается через правый борт.

Неутешительный вывод: корабль не может противостоять крутой волне 14-метровой высоты с опасной длиной равной длине корпуса корабля $\lambda = L = 123$ м. Возможно, во избежание гидродинамического удара и плавного всхождения на встречную волну корабль мог бы предварительно сбрасывать ход, вплоть до полной остановки, подобно тому, как это делают на тренировках малые лоцманские катера. Для столь крупного корабля сбрасывать ход с периодичностью чаще 9 секунд, видимо, нереально. Да и такое маневрирование невозможно при плохой видимости или ночью.

Безопасное движение вразрез волне для «Буревестника» столь же нереально по причине широкой транцевой кормы и огромной развесистой носовой оконечности. Для хода лагом к волне, подобно речным лодкам и древним лодиям, будет мешать чрезмерная бортовая качка, отчего могут возникнуть проблемы с общей прочностью корпуса.

Заключение: корабль «Буревестник» не может и не должен встречаться с предельно крутыми морскими трохоидальными волнами ни при каких обстоятельствах. По штормовым условиям это корабль ограниченного района плавания, с допуском удаления от порта убежища по времени штормового прогноза для заглавовременного ухода в укрытие.

Штормовой ход вразрез волне

Штормование носом на волну во избежание резкой бортовой качки выполняется малыми ходами, и потому нередко сводится к полной потере хода, вплоть до дельфинирования кормой вперед на обратном курсе по встречной волне. На

мостики корабля обычно предельно снижают обороты гребных винтов для обеспечения медленного и плавного прохода по гребням встречных волн, при этом регулярно теряется управляемость с заметным отклонением от удерживаемого штормового курса. В такой момент, по информации от рулевого у штурвала, временно увеличивается тяга главных машин до момента восстановления управляемости и возврата на заданный курс, без опасного превышения скорости хода на встречу волнению.

Для полнокорпусных траулеров, например, такое штормование всегда означает дрейф обратным курсом по волне кормой вперёд, так как при попытке увеличения хода возникает неприемлемая интенсивность килевой качки, с глубоким заныриванием бака под встречные волны.

Для обеспечения хода по заданному курсу, пусть даже галсами, корабль может двигаться вразрез волне, то есть с отклонением курса встречного к волновым фронтам примерно до $30^\circ \div 40^\circ$ градусов.

Ход вразрез волне, к сожалению, может быть противопоказан кораблям с носовым бульбообразованием под широким развесистым баком, где при встречах с крупными гребнями волн возникают сокрушительные гидродинамические удары по надводной поверхности носовой скулы, с жестко удерживаемой от свободного рыскания носовой оконечностью корпуса с сильно заглубленным форштевнем с бульбовым утяжелителем.

По первому внешнему впечатлению по форме корпуса штормовой ход вразрез волне осложняется для сторожевого корабля «Буревестник», и, к удивлению, морская практика автора явно показывала невозможность «безударного» курса вразрез волне для среднего траулера кормового трапления «Углекаменск». Вышеприведённые вычислительные эксперименты со штормованием носом на волну также выявили возникновение катастрофической гидромеханики этих кораблей при отклонении от курса на те же 3-4 румба, и потому эти два корпуса снимаются с дальнейших заведомо опасных опытов.

Формально любой корабль с достаточной маневренностью и мощностью главных машин (и обладающий избыточной прочностью корпуса) способен держать курс носом на волну при умелом управлении рулем, с заблаговременными командами на изменение тяги гребных винтов. В штормовых условиях становится чрезвычайно востребованным «опыт хорошей морской практики», и/или умение

грамотного использования наставлений мореплавателям по эффективному и безопасному управлению кораблём в сложных и штормовых условиях.

И если морская практика удел для особо посвященных мореплавателей, побывавших в редких штормовых переделках с катастрофическими угрозами для конкретных типов кораблей, то проработка полноценных и подробных наставлений мореплавателям вполне посильна настоящим прямым вычислительным экспериментам для любых типов кораблей и судов, включая самые жестокие штормовые условия с катастрофическими и аварийными последствиями для виртуальных цифровых моделей в произвольных групповых структурах интенсивного трохоидального морского волнения под ураганными ветрами.

Штормовой ход вразрез волне востребуется для управляемого движения в заданном географическом направлении, что особо важно, например, при спасении корабля от опасного дрейфа в сторону навигационных опасностей, или при уклонении от попадания в толчёю стоячих волн в центре тайфунов и циклонов. Однако, именно на таком курсе провоцируется захват корабля штормовой волной с наибольшей опасностью опрокидывания в вихре крутой трохоидальной волны – в гребне девятого вала. Даже на курсе лагом к волне

Формально, при хорошей видимости в дневном плавании, на мостике можно отдавать команды для снижения хода перед встречей крутого гребня, и после плавного восхождения на волну добавлять мощности машин для усиления потока от движителей на кормовых рулях, и удержания корабля на заданном курсе со скоростью превосходящей дрейф под ударами волн и напора ветров.

Штормовой ход лагом особо не угрожает слемингом или потерей управляемости от асимметрии внешних волновых сил вдоль корпуса корабля.

Ход по волне при условии поддержании интенсивного управляющего потока на кормовых рулях, не подавляемого скоростным потоком в гребнях штормовых волн, представляется лишь наиболее эффективным режимом хода с комфорtnыми условиями обитания на борту корабля, в условиях плавной и малой по размаху качке. Умелое использование энергии штормовых волн для дельфинирования с наилучшей ходкостью корабля даже при пониженной мощности главных двигателей.

Ход лагом и по волне кратко рассматриваются в заключение опытных испытаний, а пока наиболее опасный режим плавания вразрез штормовой волне.

Универсальное транспортное судно А-1203 (Univer-86)

Специальная отработка обводов транспортного судна выполнялась непосредственно в период обработки материалов по серии опытных экспериментов, с использованием ключевых выводов из мореходных испытаний гипотетических (МИДВ-85), типовых (Серия-60) и эталонных обводов («Victory») судов в гравитационной системе на регулярном волнении опытного бассейна кафедры теории корабля Ленинградского кораблестроительного института под руководством профессора Александра Николаевича Холодилина в 1985-86 годах.

Первый пробный эксперимент с нулевой начальной остойчивостью на предельно крутой волне при длине $\lambda = L_{KWL} = 160$ м и высоте $\zeta = 19,1$ м; с зыбию длиной $\lambda = 280$ м и высотой $\zeta = 13,4$ м, на длинных океанских валах $\lambda = 400$ м при высоте $\zeta = 9,6$ м. Суммарная высота $\zeta = 42$ м, немного больше четверти длины корпуса, для судна с водоизмещением $W = 25\ 000\ m^3$ маловероятна. В первые две минуты эксперимента судно ожидаемо движется с качкой по дифференту до $\psi = +13^\circ$ и креном порядка $\vartheta = \pm 8^\circ$. В момент времени $T = 2'44''$ на скорости хода $V = 4.2$ узла на миделе судна регистрируется гребень волны высотой $z = +14,2$ м с вертикальным подвсплытием корпуса только до $\zeta = +2.4$ м, к этому моменту гребень волны успевает завалить нос судна на $\chi = +46^\circ 5$ зарыскивания вправо, с креном $\vartheta = +80^\circ 4$ на правый борт практически на ровном киле по дифференту. На малом ходу судно уже не способно восстановить заданный курс вразрез волне, и после недолгого удержания лагом опрокидывается в вихре крупного прогрессивного гребня девятого вала.

Можно предположить, что на море аналогичный девятый вал обладает свойствами стоячей волны, что значительно снижет или вовсе снимает опасность штормовой катастрофы при адекватном управлении ходом и маневрированием корабля.

Пока же, принятая в вычислительном эксперименте модель задаёт чисто прогрессивное трохоидальное волнение, без подтормаживания скоростей подводных потоков, что означает завышение оценок опасности при встрече с гребнями волн предельной высоты, где в вершинах волн действуют максимальные скорости закрученных потоков воды. Аналогичное силовое или ударное воздействие гребней морских волн происходит в предельно опасных районах плавания на мелководье у побережья и на банках в открытом море, когда глубина воды становится меньше длины морских волн, и где групповые структуры с центральными девятыми валами быстро трансформируются в регулярные последовательности кноидаль-

ных гребней с предельно закрученными (не только завихрёнными) потоками в обрушающихся гребнях волн.

По записям в протоколе эксперимента получается погружение средней части корпуса под воду почти на 12 м, судно просто не успевает всплыть под гребнем волны, поднимающимся вверх с ускорением достигающим g - свободного падения. При выходе волны на верхнюю палубу возникают отрывы потоков и гидродинамические удары на плоских поверхностях, которые в рамках используемой численной модели некорректно аппроксимируются упрощёнными законами гидромеханики (и гидроупругости). К сожалению, в эксперименте ещё отработаны особые режимы подводного плавания, которые могли бы аккуратно выводить корпус судна из состояния глубокого погружения под гребнями стремительно движущихся штормовых волн.

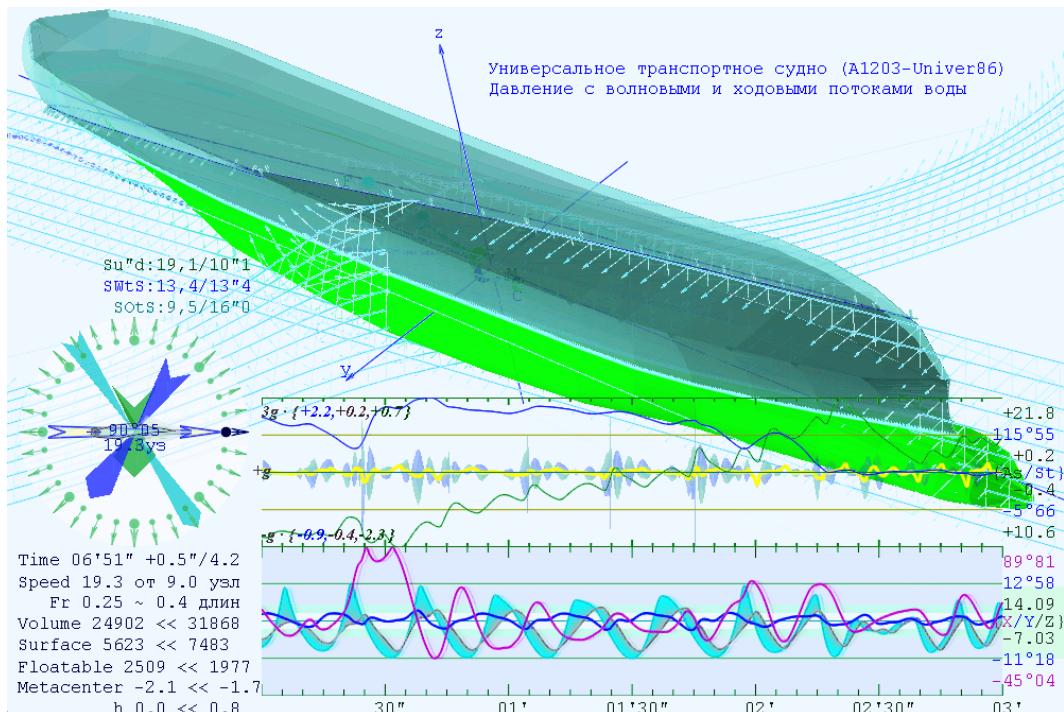


Рис. 45. Универсальное транспортное судно на отметке в 30"-й секунд увалилось на курс по волне, что не помешало лечь на правый борт. Дельфинирия на склонах волн судно разгоняется до скорости более $V = 21$ узла, и возвращается на заданный курс логом к волне с левого борта, испытывая размахи бортовой качки до $\theta \approx \pm 45^\circ$.

Универсальное транспортное судно Univer-86 обладает ярко выраженной S-образностью диаграмм остойчивости (Рис. 8), в том числе с быстро возрастаю-

щей метацентрической высотой при любом изменении посадки. Специально построенные обводы корпуса допускают полное гашение бортовой качки на умеренном волнении при установлении апериодических режимов колебаний, и в то же время, должен происходить адекватный переход колебаний корпуса к темпу силовых воздействий крутых морских волн при усилении шторма, что должно свидетельствовать о достаточности запаса остойчивости.

Проверка достижения требуемых мореходных качеств транспортного судна (Рис. 45) выполнялась в эксперименте на том же предельно интенсивном волнении $\zeta = 42$ м, с ходом на скорости $V = 9$ узлов лагом к волне с левого борта. Как уже сказано выше, на такой волне корпус судна не успевает всплыть из под гребней предельно больших волн, где вертикальное ускорение частиц жидкости соизмеримо с ускорением свободного падения g . При высоте борта в средней части корпуса судна Univer-86 порядка $z = 7$ м, высота гребней свежих волн нередко регистрируется с уровнями более $\zeta > 13$ м. При всплытии с шестиметровой глубины на плоских палубах и сломах ширстрека возникают тяжёлые перегрузки в стремительной гидромеханике быстрых волновых потоков.

Размах бортовой качки теперь достигает $\vartheta \approx -50^\circ$ на левый наветренный борт, с нередкими случаями положения на правый борт и чуть более, без перехода к опрокидыванию. По углам дифферента на групповых структурах прогрессивных волн наблюдается заныривание под волну до $\psi \geq +18^\circ$, с последующим подъемом тяжелого бульбового носа над водой до углов порядка $\psi \approx -12^\circ$.

Под кормовым подзором с объемной надводной консолью крейсерской кормы регистрируются сильные гидродинамические удары при ускорениях до $a \approx +3,2 \cdot g$, с последующим падением в «невесомости» до $a \approx -0,4 \cdot g$; а по носовой оконечности с тяжёлым бульбом всё наоборот – на всплытие нагрузки вдвое меньшие: $a \approx +2 \cdot g$, тогда как при падении носовой оконечности под волну «невесомость» усиливается троекратно до величин $a \approx -1,3 \cdot g$, что крайне опасно. Примечательно, что несмотря на столь интенсивную штормовую динамику, ускорения в средней части корпуса в ходе эксперимента не отклоняются более чем на $0,6 \cdot g$, оставаясь в пределах $a \in [-0,61 \div +0,4] \cdot g$.

Авторулевой на курсе лагом на экстремальном волнении не справляется с управлением, оконечности захватываются гребнями волн, и судно может уваливаться на курс по волне для дельфинирования со скоростью более $V > 20$ узлов, либо временно приводится на курс носом на волну, и без потери хода идти вперед на скорости порядка $V \approx 6$ узлов. Оценка осреднённого угла дрейфа за один час штормового хода вычисляется как $\chi = 22^\circ$ к правому борту.

Получается так, что столь огромные волны всяко приводят судно к опасным последствиям или в аварийное состояние, в данном случае по бортовой качке с размахом более $\vartheta > 90^\circ$ градусов на правый борт. В таких суровых условиях, при сваливании корпуса на курс лагом к волне, судно с традиционной широкой палубой и наличием углов заката на диаграммах остойчивости будет опрокидываться.

Умелое штормовое маневрирование ходом и курсом относительно волновых фронтов, при увеличенной мощности машин и умеренном повышении начальной статической остойчивости, в реальных морских условиях со стоячими гребнями девятых валов, штормовое плавание ожидаемо будет многое благополучнее.

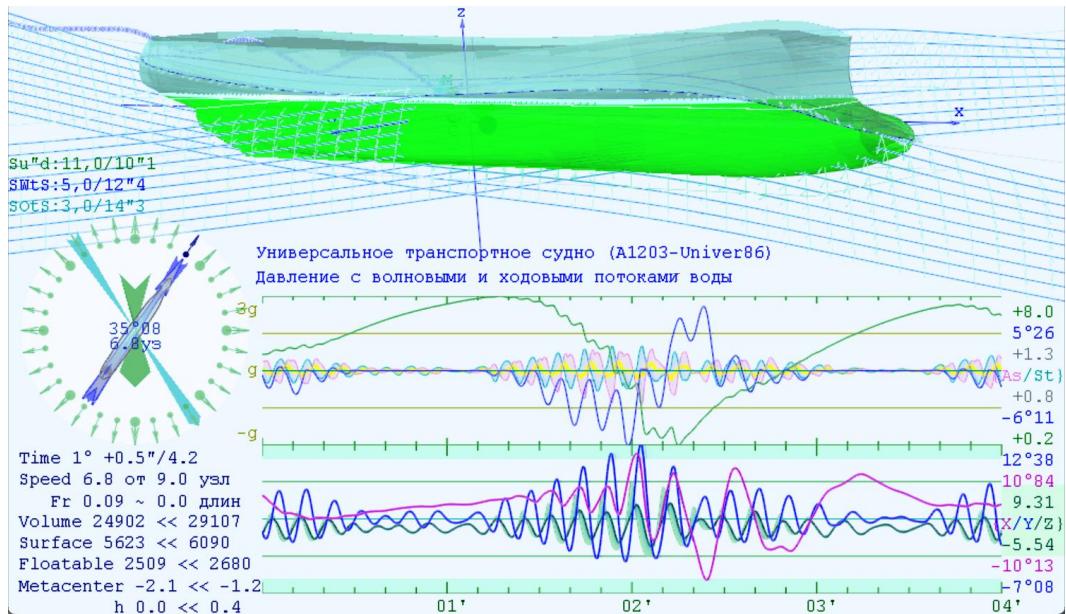


Рис. 46. Универсальное транспортное судно с умеренно сбалансированными моментами инерции площади действующей ватерлинии А-1203(Univer-86) вполне уверенно и без критических ситуаций движется в типичных штормовых условиях Тихого океана. При встрече с более чем $\zeta > 15$ -метровой волной судно заметно теряет ход, испытывая размах поперечной и продольной качки в пределах до $\vartheta, \psi \approx \pm 20^\circ$, и только в моменты прямого внешнего силового воздействия центральных волн в пакете групповой структуры.

Два других вычислительных эксперимента проводятся в условиях океанского волнения, которое вполне соответствует штормовому гидрометеорологическому режиму Тихого океана:

Волна: $\lambda=160$ м, $\tau=10.1''$, $\zeta=11.00$ м, $\alpha=0.58$, $C=15.8$ м/с, $A=180^\circ$;

Зыбь: 240 м, 12.4'', 5.00 м, 0.17, 19.4 м/с, 214°;

Вал: 320 м, 14.3'', 3.00 м, 0.08, 22.4 м/с, 146°.

где суммарная высота гребня волны оценивается величиной 19 м.

В другом варианте волнения оцениваются условно линейные процессы штормовой качки на аналогичном штормовом поле со сниженными высотами волн до: $\zeta = 8, 4$ и 2 м, соответственно для свежей волны, зыби и пологих океанских валов, с общей высотой до $\zeta = 14$ м.

Последние вычислительные эксперименты продолжались более часа по времени штормового хода транспортного судна Univer-86. Общая оценка состояния судна более чем удовлетворительная, без проявления интенсивной качки, рыскания и опасных вертикальных ускорений. При ослаблении волнения между пакетами групповых структур бортовая качка становилась апериодической и практически стихает, по килевой и вертикальной качке происходило естественное и вполне прогнозируемое отслеживание поверхности волновых склонов без видимых резонансных усилий.

Таблица

Экстремальные значения параметров состояния транспортного судна Univer-86 в штормовом плавании.

Параметр \ состояние моря	Шторм-19 $\zeta = 11, 5$ и 3 м	Шторм-14 $\zeta = 8, 4$ и 2 м
Скорость в среднем от 9 узл	$V_{CP} = 6,03$ узлов	7,38 узлов
Рыскание на курсе и дрейф, °	$\pm\chi \ 6^{\circ}11' < +0^{\circ}43' > -5^{\circ}26'$	$\pm\chi \ 3^{\circ} < +0^{\circ}21' > -1^{\circ}65'$
Вертикальная качка, м	$\pm z \ -3,72 < +0,22 > +5,00$	$\pm z \ -3,12 < +0,11 > +3,63$
Бортовая качка, °	$\pm\theta \ -10^{\circ}13' < +1^{\circ}38' > +10^{\circ}84'$	$\pm\theta \ -5^{\circ}28' < +1^{\circ}53' > +4^{\circ}81$
Килевая качка, °	$\pm\psi \ -7^{\circ}50' < +0^{\circ}41' > +12^{\circ}38'$	$\pm\psi \ -5^{\circ}78' < +0^{\circ}25' > +8^{\circ}79$
Ускорения по корме, м/с ²	$g \times (1 + \{ -0,91 \div +0,64 \})$	$g \times (1 + \{ -0,70 \div +0,56 \})$
Ускорения на миделе, м/с ²	$g \times (1 + \{ -0,27 \div +0,26 \})$	$g \times (1 + \{ -0,22 \div +0,22 \})$
Ускорения у форштевня, м/с ²	$g \times (1 + \{ -0,56 \div +0,66 \})$	$g \times (1 + \{ -0,48 \div +0,54 \})$

По каждому штормовому вычислительному эксперименту транспортное судно Univer-86 в течение часа держало курс вразрез крупным гребням волн, уве-

ренно подтверждая вполне приемлемую штормовую ходкость. Лишь изредка, при прохождении особо крупных волн (Рис. 46), ненадолго скорость снижалась практически до нуля при рыскании до $\pm 6^\circ$.

В целом, рыскание на курсе и дрейф под действием штормовых волн невелик, судно хорошо управляетя и устойчиво на курсе вразрез волне с суммарной высотой до 19 и 14 метров.

Размах вертикальной качки практически вдвое меньше предельной высоты гребней морского волнения, что подтверждает ожидаемое демпфирование и ослабление опасных резонансных явлений по килевой и вертикальной качке у корпуса со сбалансированными моментами инерции площади действующей ватерлинии в относительно широком диапазоне осадок.

Усредняющее интегрирование аппликаты вертикальной качки показывает, что чем интенсивнее штормовое волнение, тем больше судно подвсплыивает вверх, как бы интегрируя динамический уровень штормового моря (что возможно свидетельствует о некорректности математической модели для представления кинематики подводных течений).

Сохранность незакреплённого груза на палубе обеспечивается по всей длине корпуса судна. Однако, но при усилении шторма, по кормовой части порог удержания грузов на палубе без его подбрасывания в невесомость может быть преодолён за счет утрояния нагрузки под широкой консолью крейсерской кормы, по результатам экспериментов отмеряемых относительно ускорений в средней части корпуса.

Уместно отметить, что в мореходных испытаниях самоходная телеконтролируемая модель транспортного судна Univer-86 на интенсивном волнении (Рис. 26) также показывала наилучшие мореходные качества как по ходкости, так и по плавности умеренной бортовой качки.

Крейсер I-ранга «Аврора» Тихого океана

И снова прекрасным историческим образцом выступает крейсер «Аврора», обладающий штормовым подводным подрезом и завалом надводной части форштевня, с умеренно приемлемым развалом надводных ветвей носовых шпангоутов и острой малообъемной крейсерской кормой.

Пассажирский лайнер «Азербайджан»

Пассажирский лайнер «Азербайджан» по определению обязан обладать безусловной надежностью и безопасностью в штормовом плавании, даже в ущерб его ходкости в условиях интенсивного штормового волнения (и ураганных ветров – и конечно эту эмпирику несложно добавить в вычислительный эксперимент), и даже при аварийной остановке главных машин и рулевого управления.

(при регулярных и весьма частых приостановках стрелки кренометра на ограничителях по углам $\theta = \pm 38^\circ$ градусов).

Буксир-спасатель – научно-исследовательское судно

Судно обеспечения морских экспедиций не проектируется специально для наилучшей комфортности обитания экипажа. Профессиональным морякам важнее решать специальные задачи в любых навигационных и погодных условиях, с безусловным обеспечением палубных работ любой сложности с особыми механизмами и устройствами для взаимодействия с кораблями экспедиции по их требованию, в том числе в аварийных ситуациях и операциях по спасению.

Спасательное судно должно уверенно маневрировать в штормовых условиях и держать курс с минимальными дрейфовыми смещениями на крупной волне. То есть, для обеспечения минимального силового воздействия гребней штормовых волн на корпус корабля, спасатель строится с округлым корпусом со сбалансированный по ветровым нагрузкам ходовой рубкой, и с заглублённым ахтерштевнем, что необходимо для устойчивой работы винто-рулевого комплекса в условиях интенсивного волнения и ураганных ветров.

Список рисунков

- Рис. 1. Пассажирский лайнер «Любовь Орлова» без широкой транцевой кормы – обладает плавной качкой с прогнозируемой интенсивностью..... 7
- Рис. 2. Проекции бок и корпус теоретических контуров эллипсоида (сверху-слева); для диаграммы остойчивости (слева-внизу) при фиксированном положении центра тяжести (Zg) 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; $V [\text{м}^3]$ – грузовой размер; $S [\text{м}^2]$ – смоченная поверхность корпуса; $Swl [\text{м}^2]$ – площадь действующей ватерлинии; $xC = 0$, $xS = 0$ [м] – абсциссы центра величины и центра ватерлинии; r, R [м] – поперечный и продольный метацентрические радиусы; Jx, Jy [м^4] – моменты инерции площади действующей ватерлинии относительно продольной и поперечной осей корпуса. 8
- Рис. 3. Контуры корпуса куба (сверху-слева); и его диаграммы остойчивости (слева-внизу) при фиксированном положении центра тяжести (Zg) и нулевой начальной метацентрической высоте ($h=0$); справа гидростатические кривые элементов теоретического чертежа. 10
- Рис. 4. Вариант расчетов остойчивости формы корпуса для развода борта – слева; вертикальных бортов – по центру; и завала бортов – справа. Диаграммы построены для фиксированного положения центра тяжести (Zg) 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 сколовым гашением корабельных и внешних штормовых волн – справа. Диаграммы построены для фиксированного положения центра тяжести (Zg); 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 проекций корпус для теоретических чертежей с диаграммами остойчивости формы корпуса кораблей, ниже, для различных осадок при фиксированных положениях центра тяжести (Zg) 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 традиционных обводов модель корабля с малыми моментами инерции площади действующей ватерлинии (МИДВ-85), построенная и оснащенная телеметрическим оборудованием в 1985 году для сравнительных мореходных испытаний в гравитационной буксировочной системе на регулярном волнении в опытном бассейне кафедры теории корабля Ленинградского кораблестроительного института. 18
- Рис. 8. Вариант расчёта гидростатических кривых и диаграмм остойчивости гипотетического транспортного судна. При нулевой начальной остойчивости на конструктивной осадке внешние кренящие моменты малы практически до 25° волнового склона. Диаграммы остойчивости показывают заметный рост метацентрической высоты при любом изменении посадки в условиях интенсивной вертикальной качки. 20

Рис. 9. 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	
зavalом борта, а длинная вдолькорпусная надстройка на верхней палубе и бортовые кили	
способствуют компенсации остаточного кренящего момента. В случае раз渲ала 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....	22
Рис. 10. Var.1) – гидростатические характеристики модели корабля «Early-1987», построенного	
по результатам обобщения серии мореходных экспериментов в опытном бассейне кафедры	
теории корабля Ленинградского кораблестроительного института в 1985 году.	27
Рис. 11. Var.2) – остойчивость формы и кривые элементов теоретического чертежа (КЭТЧ)	
торпедного катера типа «Г-5» проекта ЦАГИ 1928 года.	28
Рис. 12. Var.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 $h = 0$	30
Рис. 13. 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.	35
Рис. 14. Вычисление волнового сопротивления; интенсивности излучения и интерференции	
корабельных волн у корпуса опытной 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.....	37
Рис. 15. 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 кругой расходящейся	
корабельной волны, которая в противофазе вместо отрыва от борта начинает оголять днище	
корпуса за пределами носовой скулы.	39
Рис. 16. Аналогичные оценки интенсивности корабельного волнообразования и волнового	
сопротивления для обновлённых в 1987 году обводов корпуса со сколовыми сужениями	
носовых и кормовых ветвей шпангоутов для плавного сопряжения набегающих потоков	
между бортовыми и днищевыми поверхностями.	40
Рис. 17. Результаты расчётов интенсивности корабельного волнообразования и волнового	
сопротивления для крейсера I-ранга «Аврора».	42
Рис. 18. Лидер эсминцев «Ташкент» итальянской постройки – образец формирования V-образных	
клиперских сколовых обводов как в носовой, так и в кормовой оконечностях корабля.	43
Рис. 19. Гидромеханика килевой качки интерпретируется с использованием исторического	
понятия волнообразующей – волновоспринимающей длины корпуса $L(\text{wave})$, за пределами	
которой на $L(kwl)$ корпус подпадает под прямые удары прогрессивных трохоидальных волн,	
где сколовые обводы и относительно низкий надводный борт должны способствовать	
стабилизации качки.....	44
Рис. 20. Крейсер «Киров» с эквидистантными ватерлиниями «струйной системы обтекания» по	
носовой скуле.	46
Рис. 21. 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.	48

Рис. 22. 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.	50
Рис. 23. 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).	51
Рис. 24. 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	52
Рис. 25. Прорисовки цифровых моделей для трёх (из пяти) проектов кораблей и судов, разработанных в рамках контракта Главного управления кораблестроения России в 2001 году, и успешно прошедшем полный цикл мореходных испытаний в опытном бассейне Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Условные названия моделей: а) корвет-1021; б) буксир-1202; в) транспортное судно-1203(Univer-86).	54
Рис. 26. Обобщенные результаты опытных 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.	55
Рис. 27. 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 трохоидального 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 склоне. Бортовая качка модели МИДВ в пределах 37° левого борта, для «Victory» это 53° на правый борт, и через $16''$ секунд судно опрокинется через левый борт.	60
Рис. 28. 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 $2,8 \cdot g$	61
Рис. 29. Слева круглая цилиндрическая бочка на волне, справа она же, но с бортовыми наклонными килями. 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 килями усиливает размах крена при бортовой качке до 39°	66
Рис. 30. Аналогичный синхронный эксперимент при длине волны $\lambda = 50$ м с высотой $\zeta = 3$ м, при этом метацентрическая высота 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.	67
Рис. 31. Вариант опытов с бортовыми килями значительно большей площади.	68
Рис. 32. Синхронный вычислительный эксперимент с мореходными испытаниями крейсера «Аврора» с чистым корпусом – нижние графики; с днищевым и бортовыми килями, и кормовым рулём – верхние графики качки.	69
Рис. 33. Аналогичные синхронные испытания для опытного корабля DTMB-5415. На верхних графиках корабль с бортовыми килями и кормовыми рулями, нижние – для чистого корпуса.	71
Рис. 34. Корвет-1201 на штормовом курсе носом на волну. Метацентрическая высота $h = 0$	77
Рис. 35. Корвет на штормовом курсе носом на волну. Метацентрическая высота $h = 0,5$ м.	78
Рис. 36. Корвет без положительной остойчивости. Метацентрическая высота $h = -0,25$ м. На интенсивном волнении корабль спрямляется, при ослаблении внешних воздействий корабль лишь отчасти кренится по усредненной диаграмме остойчивости.	79
Рис. 37. Три варианта корабельных обводов для Корвета-1201: со штормовым подрезом форштевня – слева; с подкильной гондолой – в средине; с носовым бульбом – справа.	80

Рис. 38. Критический момент штормования носом на волну для крейсера «Аврора». В момент подъёма корпуса над впадиной между гребнями волн, крен на правый борт достигает 65° без усиленной килевой качки и заметного рыскания на курсе.....	82
Рис. 39. Штормование крейсера «Аврора» носом на волну полным ходом.....	85
Рис. 40. Траулер «Углекаменск» обладает очень малым запасом остойчивости при нулевой метацентрической высоте. Интегрирование осреднённого пучка диаграмм остойчивости с волновыми воздействиями приводит к апериодической бортовой качке, и создаёт надежду успешного штормования носом на волну при умелых действиях рулевого и вахтенного штурмана. На второй минуте вычислительного эксперимента, после троёкратного погружения корпуса ниже гребня волны и заливании открытой главной палубы в носовой оконечности, малый запас остойчивости и весьма высокая скорость встречи с гребнями встречных штормовых волн приводят судно к опрокидыванию через левый борт.	87
Рис. 41. Вполне успешное штормование траулера «Углекаменск» при небольшой положительной начальной метацентрической высоте $h = 49$ см, полным ходом 9 узлов носом на волну. Очень показательны процессы ходкости и качки при удержании заданного курса в условиях нерегулярного морского волнения, в данном случае на трех групповых структурах штормовых волн. В реальности траулер в аналогичных условиях держит малый ход, отчего килевая качка становится плавной, а параметрический резонанс по углам крена уменьшается пропорционально ходкости.	88
Рис. 42. На курсе взаимозависимости ветровой волны траулер дважды захватывается встречной волной, каждый раз при сильном рыскании под волну теряется ход. Вторая встреча с гребнем волны через полторы минуты штормового хода заканчивается сильным зачерпыванием воды на верхнюю главную палубу, и опрокидыванию через правый борт.	89
Рис. 43. Корабль на штормовом курсе носом на волну разгоняется до скорости 7 узлов. Гребень девятого вала подбрасывает нос корабля вверх, отчего возникает эффект дельфинирования назад с гребня волны со скоростью $-6,3$ узла.	91
Рис. 44. Штормовой эксперимент с меньшей скоростью хода корабля. Опасность катастрофы в штормовом плавании «Буревестника» без активного маневрирования с умелым управлением ходом и курсом корабля не снижается.	93
Рис. 45. Универсальное транспортное судно на отметке в 30"-й секунд увалилось на курс по волне, что не помешало лечь на правый борт. Дельфинируя на склонах волн судно разгоняется до скорости более $V = 21$ узла, и возвращается на заданный курс логом к волне с левого борта, испытывая размах бортовой качки до $\vartheta \approx \pm 45^\circ$	98
Рис. 46. Универсальное транспортное судно с умеренно сбалансированными моментами инерции площади действующей ватерлинии А-1203(Univer-86) вполне уверенно и без критических ситуаций движется в типичных штормовых условиях Тихого океана. При встрече с более чем $\zeta > 15$ -метровой волной судно заметно теряет ход, испытывая размах поперечной и продольной качки в пределах до $\vartheta, \psi \approx \pm 20^\circ$, и только в моменты прямого внешнего силового воздействия центральных волн в пакете групповой структуры.	100

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 и Khram@mail.ru.