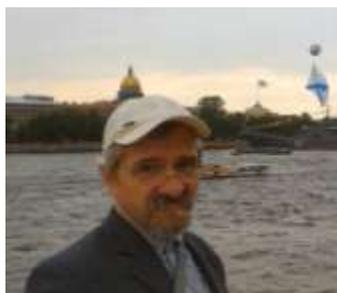


Штормовая мореходность корабля

Вычислительный эксперимент в проектных корабельных изысканиях и поверке навигационных наставлений в штормовом плавании

Вычислительный эксперимент при моделировании корабельной гидромеханики в сложных и штормовых условиях кораблевождения способен покрывать значимую часть поисковых или мореходных изысканий, отвечающих за формирование внешнего облика и общекорабельной архитектуры корабля, в первую очередь в интересах построения и обоснования наилучшей геометрии корабельных обводов. Объединенный комплекс математических моделей и вычислительных алгоритмов по теории корабля: «Hull» и мореходный вычислительный эксперимент: «Aurora» – ориентированы на мореходные изыскания на этапах проектирования океанского флота повышенной штормовой мореходности, отвечающего требованиям эффективности проведения морских работ и поддержки дальних коммуникаций; – предназначены для опытовой апробации цифровых моделей современных кораблей в навигационной практике штормового маневрирования, включая выбор и обоснование эффективных или комфортных режимов хода в условиях интенсивного волнения; – могут служить интерактивным штурманским тренажёром для практического освоения методов эффективного штормового судовождения, с отработкой вариантов маневрирования корабля в сложных навигационных и особых гидрометеорологических условиях.



Хорошая морская практика Тихого и Атлантического океанов из Калининградского мореходного училища привела на кафедру гидромеханики Ленинградского кораблестроительного института, в науки о непротиворечивом проектировании корабля. Инженерная графика и интерактивное программное обеспечение создавалось в Санкт-Петербургском государственном университете.

ШТОРМОВАЯ МОРЕХОДНОСТЬ КОРАБЛЯ

Вычислительный эксперимент проектной поверки и оценки штурманских решений по выбору режимов штормового хода и маневрирования корабля

Храмушин В. Н. *подсекция мореходных качеств судов в штормовых условиях, Российского научно-инженерного общества судостроителей им. А.Н. Крылова. г. Южно-Сахалинск, 2025.*

В теоретической и алгоритмической части настоящей работы представляется и обсуждается математический инструментарий для проведения прямых вычислительных экспериментов с визуально наглядными испытаниями штормовой мореходности корабля, полезными на этапах инженерных изысканий в проектировании обводов и общекорабельной архитектуры, а также для практического опробования режимов эффективного маневрирования кораблей и судов флота действующего.

Полагая предназначение вычислительного инструментария к открытому использованию в задачах проектирования с обоснованием мореходных качеств нового корабля, а также в составе штурманских бортовых счётно-решающих аппаратов для поиска и обоснования наиболее эффективных и безопасных вариантов штормового хода или пассивного штормования флота действующего, в проработке математических моделей и алгоритмических вычислений приоритетными стали наиболее быстрые вычислительные процессы, без особых запросов компьютерных ресурсов. Вычислительные эксперимент в целом ориентирован на персональные компьютеры среднего класса, что требуется для внедрения виртуальных мореходных экспериментов в конструкторские и корабельные счётно-решающие устройства с графической поддержкой относительно невысокой производительности.

Изложение материалов ведется в краткой форме, достаточной для повторения и проверки основных результатов расчетов и экспериментов. Книга представляет интерес для судоводителей, корабельных инженеров, курсантов мореходных училищ и всех интересующихся мореходностью корабля и вопросами проектирования обводов корпуса и общекорабельной архитектуры.

© Храмушин В.Н.

1974÷1979 – Калининградское мореходное училище

1980÷1986 – Ленинградский кораблестроительный институт

1983÷2005 – Дальневосточный политехнический институт

1987÷2025 – Научно-инженерное общество судостроителей им. А. Н. Крылова

2012÷2018 – Санкт-Петербургский государственный университет.

2017÷2025 – צור הדסה, ירושלים

Содержание

<i>Предисловие</i>	6
<i>Введение</i>	8
I. «Hull» – обводы корпуса, теория корабля и корабельное волнообразование	10
<i>Модель цифровых теоретических чертежей – таблицы плазовых ординат и штевней корабля в комплексе «Vessel»</i>	14
<i>Графическая визуализация корабельных обводов и доступ к подборке вычислительных процедур</i>	17
<i>Простые математические модели формы корпуса с возможностью аффинной и скуловой трансформации</i>	19
<i>Аналитические обводы для отработки ключевых характеристик формы корпуса корабля</i>	22
<i>“Параболические” (степенные) обводы</i>	23
<i>Асимметричный относительно мидельшпангоута корпус</i>	24
<i>Штевни</i>	28
<i>Кривые элементов теоретического чертежа и диаграммы остойчивости в диапазонах осадок интенсивной вертикальной качки</i>	30
<i>Основные гидростатические интегралы и соотношения</i>	34
<i>Интенсивность корабельного волнообразования в расчётах волнового сопротивления движению корабля</i>	39
II. «Augora» – вычислительный эксперимент или опыты штормового маневрирования	53
<i>Краткое представление математических моделей и алгоритмов</i>	54
<i>1. Информационная консоль и графические окна визуализации мореходности корабля в штормовом море, интерактивное управление вычислительным экспериментом</i>	59
<i>Общий графический интерфейс морского вычислительного эксперимента</i>	65
<i>Гидромеханика корабля: выбор и включение в эксперимент математических и алгоритмических моделей</i>	67
<i>Интерактивное управление ходом и курсом корабля</i>	69
<i>Сохранение цифровых моделей корабля в инородных форматах</i>	72
<i>2. «Аксонметрический вид корабля и профилей морских волн»</i>	76
<i>Гидростатические и метацентрические воззрения в динамике корабля</i>	84

3. «Корабль и трохоидаьные штормовые структуры морских волн»	87
<i>Предустановка условий опытовых испытаний по штормовой мореходности корабля</i>	90
<i>Результаты опытовых мореходных экспериментов</i>	102
III. Математические и алгоритмические модели прямых вычислительных экспериментов в теории корабля и гидромеханике штормовой мореходности	109
Логическая формализация вычислительной задачи по моделированию штормовой гидромеханики корабля	111
Схема вычислительного эксперимента с кораблем в штормовом море	114
К вопросу о действии внешних сил, реакций корпуса и связанных моментов	117
<i>Алгоритмы и структуры данных в построении цифровой модели корпуса корабля</i>	127
Геометрия обводов и алгоритмы представления корпуса корабля....	128
Основные элементы числовой структуры для определения геометрии корабельных обводов с элементами общекорабельной архитектуры	131
Особенности графической визуализации модели корпуса корабля...	133
Настройки графической сцены визуализации вычислительного эксперимента	138
<i>Гидродинамика корабля в условиях штормового плавания</i>	139
Список принятых обозначений в штормовой гидромеханике корабля	140
Математические объекты и операции пространственной гидромеханики в корабельном и внешнем координатных базисах	141
Об особенностях математической модели движения корабля в условиях интенсивного волнения	143
Об интерактивном выборе вариантов построения вычислительных экспериментов	147
Вычисление геометрических характеристик корпуса корабля	151
Метацентрические характеристики в экспресс оценках текущего состояния корабля	156
Углы Крылова в визуальном представлении состояния корабля.....	159
Гидростатические компоненты плавучести на штормовой волне	163
Ходовой и волновой поток вблизи судовой обшивки	166
Гидростатическая асимметрия объёмных интегралов на волновом склоне	175
<i>Алгоритмы гидромеханики качки и ходкости корабля на интенсивном волнении</i>	177

Демпфирование инерционных сил и моментов по штормовой качке и дрейфу корпуса	179
Алгоритмы моделей движения и демпфирования колебаний корпуса	183
Автоматическое регулирование и адаптивное управление курсом и скоростью хода	192
<i>Вычислительная модель групповых структур морского волнения</i>	<i>195</i>
Основные зависимости и обозначения из теории волн	195
О вычислительных опытах с моделями морского волнения	198
О моделировании трохoidalного штормового волнения	200
Геометрическая кинематика морского и прибрежного волнения	206
Математическая и вычислительная модели трохoidalного волнения	207
Видимые (фазовые) и групповые скорости гравитационных волн	214
Алгоритмическое представление моделей штормового волнения	216
<i>Заключение</i>	<i>219</i>
IV. Экспериментальные изыскания мореходности и вычислительные эксперименты с проработкой обводов корпуса корабля	220
<i>Синтез проектных предпосылок из анализа гидростатики, устойчивости и ходкости корабля на тихой воде.</i>	<i>221</i>
О наставлениях мореплавателям	222
К морской практике.....	222
К обоснованию вычислительных экспериментов	224
Гидростатические оценки и ориентация на ходкость.....	224
О корректности дифференциальных уравнений качки корабля.....	225
<i>Запас устойчивости при формировании обводов в средней части корпуса</i>	<i>226</i>
Геометрические особенности обводов корпуса и оценки запаса устойчивости корабля.....	235
Предварительные заключения по штормовой устойчивости и гидродинамике корабля.....	244
<i>Корабельное волнообразование – отражение штормовых волн от корпуса корабля.....</i>	<i>257</i>
Особенности корабельного волнообразования и влияние обводов на силовую реакцию под воздействием штормовых волн	259
«Аврора», «Ташкент», «Киров» – килевая качка и ходкость на волнении	269
Опытовые испытания и сравнительная апробация современных, гипотетических и эволюционных обводов корпуса корабля	277
Всепогодный океанский флот Главного управления кораблестроения России 2001 года	284

Постановка и проведение прямых вычислительных экспериментов с кораблём в штормовом море.....	289
<i>Особенности реализации штормовых опытовых и вычислительных экспериментов.....</i>	<i>295</i>
<i>Бортовые кили и крылья активных успокоителей качки</i>	<i>297</i>
<i>Мореходные испытания кораблей перспективного и действующего флота</i>	<i>308</i>
Корвет-1201 – корабль гидрографической и патрульной службы	313
Крейсер I-ранга «Аврора» Тихого океана.....	318
«Углекаменск» - средний рыболовный траулер морозильный, кормового траления	325
Сторожевой корабль «Буревестник»	330
<i>Штормовой ход вразрез волне.....</i>	<i>336</i>
Универсальное транспортное судно А-1203 (Univer-86)	338
Буксир-спасатель – научно-исследовательское судно	346
<i>Общее заключение.....</i>	<i>353</i>
Использованные источники морских и корабельных изысканий. 355	
Теоретические вопросы кораблестроения и гидромеханики.....	356
Вопросы проектирования и технической эксплуатации флота	357
Историческая	358
<i>Программные комплексы и базы данных</i>	<i>359</i>
<i>Патенты и заявки на изобретения.....</i>	<i>360</i>
<i>Полезные модели</i>	<i>362</i>
<i>Авторское наследие настоящих корабельных изысканий.....</i>	<i>363</i>

Предисловие

Вычислительные эксперименты с моделированием гидромеханики взаимодействия корабля и штормового океана весьма значимы в обоснованиях ключевых инженерных предпосылок на ранних стадиях проектирования перспективного всепогодного корабля, также как и в последующем синтезе наставлений мореплавателям в непротиворечивом согласовании с положениями морской грамотности и хорошей морской практики для конкретных типов кораблей, с учётом конкретных навигационно-гидрографических и гидрометеорологических условий всепогодного мореходства.

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

Показательными качествами мореходности корабля являются пределы допустимого крена при нулевой или отрицательной начальной метacentрической высоте, изначально благоприятствующие штормовому маневрированию корабля на трохoidalных гребнях глубокой воды и кноидальных валах прибрежной зыби. Снижение начальной остойчивости всегда означает умеренность и плавность качки, в свою очередь способствующие эффективности хода и свободе действий корабля в сложных погодных условиях, и расширяющие возможности по выбору курса при заданной ходкости под ураганными ветрами и ударами гребней трохoidalных волн и кноидальных валов на морских и прибрежных мелководьях.

Проектные особенности, мореходные качества и условия маневрирования корабля в реальном штормовом плавании классифицируются по

трём уровням навигационно-гидрографической и гидрометеорологической обстановки на мелководных фарватерах и 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 атмосферного циклона или тайфуна;

2 – ход на континентальном шельфе, и особо – на морских мелководных банках, где глубина моря становится соизмеримой по величине с длиной штормовой волны, а гребни трохоидальных волн обращаются крутыми кноидальными валами с быстрыми потоками воды;

3 – ход ограниченными прибрежными фарватерами, в зонах рейдовых разделений движения или маневрирование в воротах порта и среди моллов портовых гаваней, где крайне важны прогнозы опасных маневров с заблаговременным назначением времени прохода и точного маневрирования с посекундной предварительной прокладкой маршрутов и взаимодействия с портовыми буксирами, по необходимости.

Численное моделирование штормового маневрирования полезно в оперативной обстановке и востребуется на ходовом мостике для экспериментальной апробации навигационных решений в составе счётно-решающих приборов для предвычисления сложных или опасных маневров корабля. Обоснованием адекватности опытовых прогнозов здесь служат бортовые комплексы наблюдения за окружающей обстановкой и бортовая телеметрия реального контроля текущего состояния корабля, что важно в обеспечение эффективных маневров при назначении режимов с наилучшей ходкостью и/или обитаемостью в сложных, штормовых или аварийных условиях кораблевождения на дальних океанских коммуникациях и рыбных промыслах, что особо актуально для Дальнего Востока России.

Введение

Объединенный комплекс математических моделей и вычислительных алгоритмов по теории корабля «Hull» и мореходный вычислительный эксперимент «Auroga»¹:

— ориентированы на мореходные изыскания в ходе этапов проектирования океанского флота повышенной штормовой мореходности, отвечающего требованиям эффективности проведения морских работ и поддержки дальних коммуникаций;

— предназначены для опытовой апробации цифровой модели действующего корабля в навигационной практике штормового маневрирования, включая выбор и обоснование эффективных или комфортных режимов хода в условиях интенсивного волнения;

— могут служить интерактивным штурманским тренажёром для практического освоения методов эффективного штормового судовождения, с отработкой вариантов маневрирования корабля в сложных навигационных и особых гидрометеорологических условиях.

Вычислительный эксперимент настраивается на проведение испытаний ходкости и качки корабля в реальном масштабе времени с проектными размерными и динамическими характеристиками настоящего корабля. В процессе моделирования возможно изменение аппликаты центра тяжести (метацентрической высоты), осадки и параметров демпфирования. Интерактивное управление курсом включает авторулевой, выбор скорости хода определяется тягой движителей по условиям тихой воды, что сообразует штормовую ходкость и рыскание, включая дельфинирование, захваты корпуса или брочинг.

¹ © 1975 СВО КМУ ÷ 2012 КММС ПМ–ПУ СПбГУ ÷ 2025 ירושלים.

Морское волнение в акватории вычислительного эксперимента возбуждается с помощью трёх перенастраиваемых групповых структур, с возможностью достижения предельной крутизны и высоты гребней штормовых трохоидальных волн. *Все гребни волн представляются подвижными (прогрессивными), подобным прибережному накату или кноидальным валам на мелководных морских банках, что настоящей постановке проблемы означает опытовые испытания «ближе опасности».*

В открытом море экстремально высокие гребни проявляются отчасти стоячими, что в хорошей морской практике служит обоснованием всепогодной эффективности и безопасности мореходства. Чисто прогрессивные трохоидальные волны чрезвычайно опасны в плане силового и вихревого воздействия на корабль в море, однако, в вычислительных экспериментах предусмотрена возможность исключения импульсного воздействия волновых потоков, что в гидромеханике будет соответствовать воздействию стоячих волн – наиболее крутых девярых валов. Более сложные модели нестационарной гидромеханики планируются к внедрению в вычислительный эксперимент после доработки и практической проверки моделей штормового волнения с новыми сценариями для работы со шквальными ветрами.

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

I. «HULL» – ОБВОДЫ КОРПУСА, ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И КОРАБЕЛЬНОЕ ВОЛНООБРАЗОВАНИЕ

Математическая модель геометрии корпуса корабля строится на плоских контурах традиционных теоретических шпангоутов, дополняемых в диаметральной плоскости контурами днища, палуб и штевней с транцевыми расширениями. Визуально такая оцифровка в точности соответствует графическому представлению корпуса в трёх проекциях типовых теоретических чертежей, что формально позволяет опираться на исторически проверенные форматы исходных данных для расчётных методик из классического учебника [6].

Выбранная таким образом цифровая модель позволяет опираться на ранее проверенные методики теории корабля и корабельной гидромеханики, что важно для обоснования корректности новых вычислительных экспериментов в сопоставлении многочисленными историческими сериями кораблестроительных расчётов, в том числе включающих материалы бортовой корабельной документации и результаты ранее систематизированных экспериментов в опытовых бассейнах и мореходных испытаниях в открытом море. Сбережение преемственности в эволюционном обновлении корабельного и морского инструментария отвечает как поиску эффективных инженерных решений в проектировании корабля, так и в последующей проработке ключевых наставлений мореплавателям в согласии с хорошей морской практики.

Принятое числовое представление теоретических чертежей корпуса корабля в форме таблиц плазовых ординат изначально ориентировано на традиционные методики расчетов в теории и гидромеханике корабля, и реализованы в программном комплексе «Hull» [2010, часть 1]. Накопление вариантов корабельных обводов проводится в составе базы данных «Vessel» [2015], на июль 2025 года содержащей 163 (из них 77 из

Free!Ship) цифровых моделей различных кораблей, судов и малых плавсредств, и 26 – тестовых геометрических построений плавающих тел. Все числовые модели подстроены к проведению прямых вычислительных экспериментов с использованием комплекса алгоритмов «Аурога» [часть.2], реализующих интерактивное управление кораблём в штормовом плавании, с возможностью визуального контроля и воздействия на состояние корабля и штормового моря.

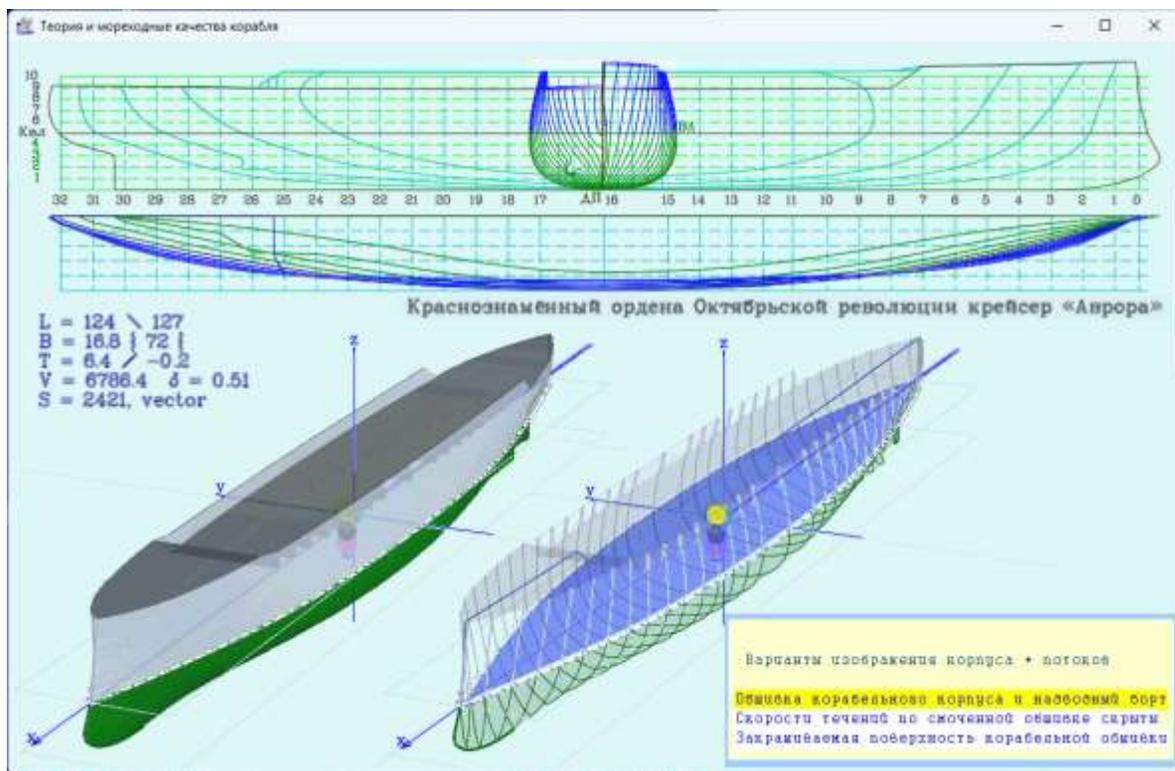


Рис. 1. Прорисовки по цифровой модели крейсера «Аврора», выполненные с помощью числовых последовательностей для шпангоутов и штевней. Отсчёты абсцисс ведутся от кормы в нос, шпангоуты размечаются от носового перпендикуляра в корму. Симметричный относительно диаметральной плоскости корпус имеет положительные ординаты, при этом функции их описания могут быть неоднозначными. Аппликаты шпангоутов и штевней размечаются снизу – вверх, от основной линии к ширстрекку, с оконтуриванием фальшбортов и надстроек. Три проекции теоретического чертежа на верхних рисунках подготовлены программой «Hull», аксонометрические проекции – в программе «Аурога».

Регуляризованные последовательности шпаций и точек в контурах шпангоутов, дополненные в диаметральной плоскости очертанием штевной с транцевыми расширениями, служат ускоренной выборке ординат для вычисления объемных и поверхностных интегралов, с учётом быстро меняющейся посадки корпуса корабля в условиях интенсивной качки; при движении по склонам и между гребнями морских волн большой высоты. Абсциссы шпангоутов размечаются от кормы в нос, опорные точки кривых на шпангоутах и штевнях отсчитываются от киля вверх до палубного ширстрека, с оконтуриванием фальшбортов, палубных надстроек и других крупных элементов общекорабельной архитектуры.

Геометрическая модель для вычислительного эксперимента в программе «Aurora» допускает построение многокорпусных моделей, однако, в текущей версии без точного описания штевной и с оговорками относительно включения в гидродинамическое моделирование интегралов по разрывным поверхностям действующей ватерлинии.

Относительно малое количество шпангоутов и интерполирующих точек (Рис. 1), тем не менее, позволяет с удовлетворительной точностью аппроксимировать гладкую поверхность бортовой обшивки, что минимально необходимо для оценочных расчётов в теории корабля, так же как и в проведении адекватных прямых вычислительных экспериментов по моделированию качки, ходкости, и штормового маневрирования, включая опытовое обоснование наиболее эффективных режимов всепогодного мореходства.

Поверочным инструментом выступает система управления базой данных «Vessel» – программный комплекс «Hull» Сахалинского государственного университета, в котором все расчёты по теории корабля выполняются в строгом соответствии с общепринятыми [6] (историческими) методиками. База данных «Vessel» также включает иные цифровые форматы описания корпуса корабля, которые по необходимости конвертиру-

ются к принятому здесь обновлённому представлению. В частности, программа «Hull» без параметров порождает образец корпуса с уменьшенным моментом инерции площади действующей ватерлинии «Hull.vsl» в формате кафедры конструкции судов Ленинградского кораблестроительного института, который широко использовался ранее при опытовых мореходных испытаниях по кафедре теории корабля в 1985-1986 годах.

Попутно в программе «Hull» выполняются расчёты водоизмещения, смоченной поверхности, центров объема и коэффициентов полноты, выполняемых непосредственно при визуализации всех трёх проекций теоретических чертежей.

В интерактивном режиме возможно построение аналитических синусоидальных, полиномиальных и простейших геометрических обводов корпуса, а также проведение аффинных геометрических преобразований.

В отдельных окнах, с использованием трёх авторских методик, выполняются вычисления и построение кривых элементов теоретического чертежа (гидростатических кривых); а также расчеты и построение диаграмм остойчивости при различных осадках с различными методами фиксации аппликаты центра тяжести. Реализовано также построение кривых волнового и остаточного сопротивления движению корабля на тихой воде, с прорисовкой вдоль корпуса интенсивности излучения корабельных волн.

Варианты цифровых моделей корабельных корпусов систематизированы в составе базы данных цифровых теоретических чертежей «Vessel», зарегистрированной в Роспатенте Санкт-Петербургским государственным университетом. Исходные оригиналы теоретических чертежей в основном оцифровывались по копиям в традиционных кораблестроительных проекциях, и являются либо авторскими [18], либо выбраны из открытых публикаций и материалов научных кораблестроительных конференций. Некоторые модели действующих кораблей и судов оцифровывались по растровым копиям из условно «безымянных» источников, и в том числе с

видимыми искажениями оригинальных чертежей, и потому ограниченно рекомендуются для практического использования в навигационных тренажерах по штормовому маневрированию.

Модель цифровых теоретических чертежей – таблицы плазовых ординат и штевней корабля в комплексе «Vessel»

// Комментарии и техническая информации по кораблю (// или ;)	
1. Признак формата ($\blacktriangle=0x1E_{(alt+30)}$) и <название> в угловых скобках	
2. N M – длина таблицы плазовых ординат и номер мидельшпангоута	
3. L B T Δt – размерения корпуса: длина, ширина, осадка с добавкой	
{n} – количество точек на теоретическом контуре	4. $n \{ z x... \}$ – абсциссы контура ахтерштевня по аппликатам
	5. $n \{ z y... \}$ – ординаты ширины транца
	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg); font-size: small; margin-right: 10px;"> {x} – абсциссы местоположения шпангоутов (от кормы в нос) </div> <div> 6. $n \times \{ z y... \}$ – плазовые таблицы формируются контурами кривых с аппликатами и ординатами точек на шпангоутах с отчётами от основной линии корпуса. Совпадение точек отмечает линии словов борта. </div> </div>
	7+N $n \{ z y... \}$ – ординаты утолщения форштевня и бульба
	8.+N $n \{ z x... \}$ – абсциссы контура форштевня
~ Характеристики корпуса: (водоизмещение, смоченная поверхность, полнота)	
~ Подпись – дата последнего форматирования	

Рис. 2. Структура текстового формирования числовой таблицы плазовых ординат корпуса корабля, с доопределениями граничных контуров штевней и транцевых расширений.

База данных «Vessel» в целом управляется специальной программой «Null», и по необходимости дополняется файлами конфигурации–протоколами <имя>.vil для проведения прямых вычислительных экспериментов по моделированию штормового маневрирования корабля с использованием комплекса «Aurora». Система в целом: («Null»+«Aurora»)

– предназначается академическим исследованиям и оценочным изысканиям на этапах проектирования новых кораблей и судов повышенной штормовой мореходности, и будет весьма полезна судоводителям для отработки вариантов штормового хода и маневрирования в условиях интенсивного ветрового волнения с наложением двух структур зыби.

Числовой формат базы данных «Vessel» изначально ориентирован на оцифровку традиционных теоретических чертежей корабля непосредственно по копиям на бумаге. Преимуществом принятого числового описания корпуса по штевням и шпангоутам видится в относительной простоте и компактности компоновки исходных данных, которые могут быть подготовлены, и впоследствии отредактированы в качестве текстовых строк. Теоретические чертежи обычно содержат двадцать основных с небольшим количеством промежуточных шпангоутов в оконечностях, что достаточно для проведения оценочных вычислительных экспериментов по моделированию штормового маневрирования корабля, при этом явно не потребуются суперкомпьютерные ресурсы для построения и реализации таких опытовых экспериментов, в том числе в реальном времени.

Формализованное описание геометрии корпуса корабля в составе базы данных «Vessel» представляется строковыми записями, включающими название и размерения корпуса корабля, с последовательным описанием кормовой оконечности, полной таблицы плазовых ординат, и затем – форштевня (Рис. 2).

Контуры шпангоутов начинаются от основной килевой линии или межкорпусного подволока катамарана (z_{\min}) в диаметральной плоскости ($y=0$), с замыканием через верхние точки (z_{\max}) палубы или судовых надстроек. Штевни представляются однозначными функциями абсцисс (x) по аргументу от аппликат (z), дополняемые ординатами (y) для транцевых расширений по аналогии с замкнутыми контурами теоретических шпангоутов ($y(z(x))$).

Величина ΔT – погружение используется в случае оцифровки таблицы ординат не от основной плоскости, а, например – от конструктивной ватерлинии. Эта же величина полезна для указания начального погружения корпуса, например в вычислительных экспериментах с подводной лодкой ².

При включении цифровой модели корпуса «*.vsl» в базу данных «Vessel», в комментариях описываются необходимые тактико-технические и исторические данные о корабле, а также расчетные водоизмещение, площадь смоченной поверхности, коэффициент общей полноты корпуса, дата и время создания файла и последней правки обводов и формы корпуса, и другая полезная информация по модели корабля.

Ориентация на стандартные методики в теории корабля с использованием методов интегрирования по таблицам плазовых ординат, к сожалению, некорректно применяется в случаях с неоднозначными функциям ординат по аппликатам шпангоутных контуров, возникающих в тоннельных обводах, на бортовых киях и других выступающих частях на смоченной обшивке корпуса. В программном комплексе «Hull» такие вычисления ведутся с погрешностями от простого отсечения повторных пересечений ватерлиний при последовательном считывании шпангоутных контуров от кия к палубам. То есть, геометрические вычисления в моделях теории корабля и корабельного волнообразования реально получаются с ограничениями по точности, свойственными ориентации на расчёты по традиционным таблицам плазовых ординат.

В алгоритмах программы «Aurora» указанные проблемы исключаются задействованием полноценных контурных или параметрических интегралов в векторно-тензорном представлении вычислительных операций в трёхмерном пространстве, где включаются вполне адекватные геометри-

² автоматическое управление глубиной хода в июле 2025 в разработке.

ческие построения для всех гидростатических и гидродинамических вычислений, в том числе для многокорпусных проектов судов, с обеспечением адекватного моделирования движения корабля во взаимодействии с ураганным ветром³ и штормовым волнением на море.

Графическая визуализация корабельных обводов и доступ к подборке вычислительных процедур

Программа «Hull» единственным параметром принимает текстовый файл с цифровой моделью корпуса корабля «*.vsl». При неудаче, в текущую директорию будет записан, и сразу же считан файл-образец⁴ «Hull.vsl» с изначальной цифровой моделью [52] корпуса МИДВ⁵-1985.

На экране прорисовываются три проекции теоретического чертежа (Рис. 3), ординаты, аппликаты и абсциссы которого считываются

Hull Обводы, гидростатика и остойчивость корабля + волновое сопротивление.
F1 краткая справка
F2/F2 запись/считывание корпуса
F4 Математическая аналитика
F5 Гидростатика + остойчивость
Волнообразование и ходкость
F7 от «Штормовой мореходности»
F8 из Корабелки + А.Н.Шебалов
F9 ++ остаточное от А.Ш.Готман
<Enter> масштаб по ширине окна
<Space> шпангоуты сплайн\линии
<Esc>/<ctrlC> завершение

подвижным курсором в нижних красных строках справа. В левой нижней части приводятся размерности корпуса, водоизмещение, коэффициент общей полноты и площадь смоченной поверхности обшивки корпуса на заданной осадке.

На основном экране доступна справка <F1>, где упоминаются операции записи <F2> / считывания <F3> нового корпуса; <F4> аффинные преобразования размерностей или построение двух вариантов аналитиче-

³ в версии за июль 2025 года действие шквального ветра не включено.

⁴ в формате кафедры конструкции судов Ленинградского кораблестроительного института (©1985, автор Игорь Владимирович Степанов).

⁵ с Малыми моментами Инерции площади Действующей Ватерлинии.

ских корпусов; а также вызов процедур для расчетов гидростатики и остойчивости <F5>; и три модели вычислений волнового <F8-F9> и остаточного сопротивления <F7> воды движению корабля.

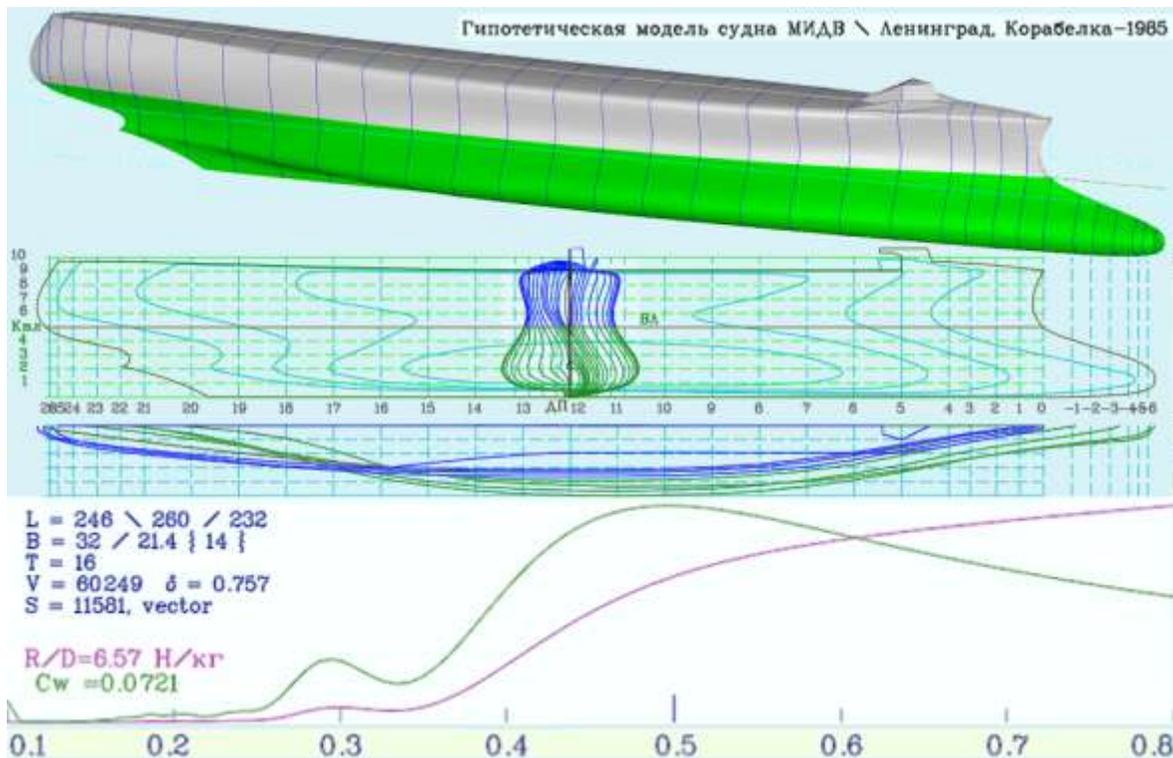


Рис. 3. Экспериментальная модель корпуса гипотетического корабля с уменьшенными моментами инерции площади действующей ватерлинии (МИДВ), и со смещенным в нос центром величины подводного объема. В 1985 г. модель участвовала в мореходных испытаниях в опытном бассейне кафедры теории корабля Ленинградского кораблестроительного института под руководством профессора Александра Николаевича Холодилина. На графиках коэффициенты и величины относительного волнового сопротивления.

Для прорисовки контуров шпангоутов по команде: <Пробел> последовательно переключается режимы изображения в отрезках, или со сглаживанием контуров сплайн-функциями с разметкой узловых точек.

Перемасштабирование чертежей: <Ввод> выполняется в пропорциях исходного масштаба с сохранением ширины графического окна.

<F2 – Ship Hull Digital Loft> – запись цифровой модели корпуса из оперативной памяти во внешний файл. Запрашивается новое имя, в котором по умолчанию предлагаются цифры даты и времени: «ГГММДД-ЧЧММ.vsl».

При запросе на считывание нового цифрового теоретического чертежа: <F3 – Choice hull from 'vsl' file or Esc to MIDV ship> – открывается стандартное окно файловой системы для выбора файлов с расширением «*.vsl». При отказе от считывания нового файла происходит автоматическое формирование и считывание файла-образца «Hull.vsl» цифровой модели гипотетического корпуса МИДВ-85 (Рис. 3).

Простые математические модели формы корпуса с возможностью аффинной и скуловой трансформации

Пропорциональные трансформации корпуса и ссылки на построение аналитических обводов собраны в блоке процедур <F4> – «Математическая аналитика». Изначально в меню «Аналитические обводы корпуса» предназначалось для построения комбинированных моделей из наследия атлантических экспедиций в 70-х годах.

Варианты формирования корабельных обводов и надводного борта представляются в комбинациях из: **1** –

полиномиальных и **2** – **экспоненциально-тригонометрических** функций. Эти весьма сложные геометрические модели рассматриваются в следующем параграфе.

Аналитические обводы корпуса
1 – на степенных функциях
2 – синусно-показательных
<<Простые преобразования>>
x · 1.000 y · 1.000 z · 1.000
Сдвиг по X: 0.000 Z: 1.000
Рёбра ≥ 0.0 мм на 1°
<< Эллипсоиды и другое... >>
Корпус: L=20 B=10 №=65
<< обводы скуловых волн >>
по борту: степень 3.0

Следующие три блока меню исполняются по команде «ввод» с клавиатуры или отметкой указателем курсора «мышь» на заголовке в двойных угловых скобках.

В раздел <<Простые преобразования>> включены возможности «аффинного» (пропорционального) геометрического преобразования корпуса в оперативной памяти, с возможностью его последующего сохранения. В полях $x \cdot []$, $y \cdot []$, $z \cdot []$ указываются масштабные коэффициенты по всем трём направлениям, под ними пункт «Сдвиг» для смещения корпуса в X : продольном и Z : вертикальном направлениях.

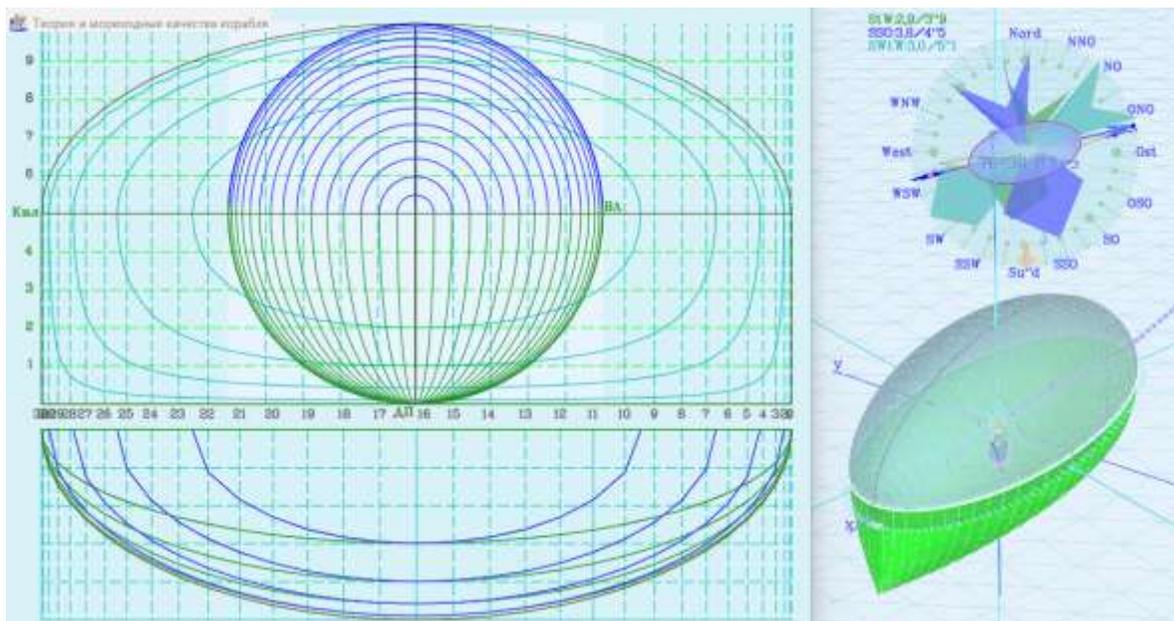


Рис. 4. «Шлюпка» – Модель на базе эллипсоида с равноудалёнными подводными ватерлиниями. Чисто эллиптическая форма надводной части корпуса предполагает её минимальное влияние при испытаниях на интенсивном штормовом волнении. Справа сверху показана картушка вычислительного эксперимента с изображением кренометра и аксиометра положения руля, направления и крутизны штормовых волн с надписями их характеристик; стрелок действующего и заданного направления движения корабля, с указанием мгновенных значений курса и скорости в центре картушки.

Пункт «Рёбра» – в третьей строке второго блока, указывается величина минимального интервала узлов на контурах теоретических шпангоутов и штевней, которые попарно объединяются, если длина и угол между

смежными рёбрами не превышает указанной величины. При отрицательной величине минимального интервала из контуров не удаляются совпадающие узлы. Весьма важная операция для прореживания узлов числовой модели корпуса с целью ускорения вычислительного эксперимента. Количество шпангоутов можно уменьшить закрытием строк данных символами комментариев: «;» или «//» в файлах [Ship].vsl.

В разделе <<**Эллипсоиды и другое...**>> в качестве аналитических моделей судовых обводов выбираются элементарно простые геометрические объекты, что требуется для сравнительных испытаний и тестирования вычислительных экспериментов. Четыре модели: «**Эллипс**» – *удлинённый шарик*; «**Шлюпка**» – *эллипсоид с равноудалёнными ватерлиниями*; «**Корпус**» – *обводы на синусоидальных ватерлиниях со шпангоутами кубической полноты*; «**Кирпич**» – *прямоугольный параллелепипед*. В указаниях размерений нет особых ограничений, можно указывать: **L** (>1) – длину; **B** (>1) – ширину нового корпуса и **№** (>2) – количество аппроксимирующих шпангоутов. Осадка будет предварительно устанавливается в половину ширины корпуса $T = B/2$, но это можно затем перенастроить с помощью аффинных преобразований.

Простейшие полиномиальные и тригонометрические модели корпуса естественным образом сводятся к скруглённым скулам увеличенной полноты в оконечностях (Рис. 4), что соответствует примитивным схемам «струйных систем» обтекания по И. П. Алымову⁶ [1878], принципиально негодим по ходкости и качке на волнении.

Для приведения корпуса к оптимальным для штормового хода V -образным или клиперским скуловым шпангоутам (Рис. 5) предусмотрена процедура «**обводы скуловых волн**», по которой ветви скуловых

⁶ *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».

шпангоутов в оконечностях заостряются по V-образной схеме, что необходимо для смещения действия всех сил волновой природы в сторону миделя, с трансформированием килевой качки в вертикальную, с попутным улучшением гидродинамических качеств корпуса в целом.

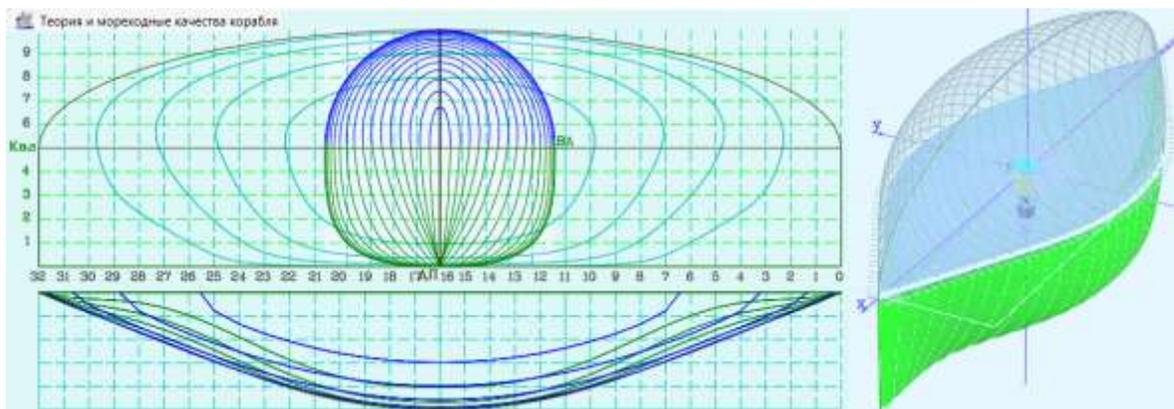


Рис. 5. Вариант «Корпуса» с однократным улучшением скуловых обводов по алгоритму: «ОБВОДЫ СКУЛОВЫХ ВОЛН» для всей высоты борта со степенью полинома = 3.

Выбором в поле ниже предусматривается переключение режимов **«по борту»** для всей высоты корпуса, и **«по осадке»** – для скуловых заострений только по обводам ниже конструктивной ватерлинии.

Параметром **«степень»** регулируется заострение ватерлиний и продольная полнота корпуса. При малых значениях «степени», в том числе меньше единицы, ватерлинии заметно заостряются по всей высоте корпуса, при увеличении «степени», например, более 3 – действие параметра видится существенным более для глубоких ватерлиний.

Аналитические обводы для отработки ключевых характеристик формы корпуса корабля

Две аналитические модели формы корпуса подготавливаются во вложенных меню: **«1 – на степенных функциях»** и **«2 – синус экспоненциальных»** функциях.

Ординаты корпуса $Y(z, x)$ на «степенных функциях» (Рис. 6) образуют плавно-монотонные обводы, с полнотой по показателям степеней P_x , P_z ; и заострением на штевнях по косинусоиде с параметром $C_x \in [0 \div 1]$ – заострением до полной синусоиды при $C_x = 1$; и образованием развала борта в средней части корпуса при $K_p > 1$ или завала при $K_p < 1$.

Корпус, построенный на степенных функциях
 Шпангоуты $P_z = 6.0$
 Ватерлинии $P_x = 3.0$
 Заострение $C_x = 0.50 \in [0 \div 1]$
 Борт $K_p = 1.00$ развал > 1 завал

$$Y(z, x) = B \cdot (1 - |2x/L|^{P_x}) \cdot \cos(C_x \cdot \pi/2) \cdot (1 - |z/T|^{P_z}) \cdot (1 + (1 - K_p) \cdot z)/2,$$

где: B – ширина корпуса.

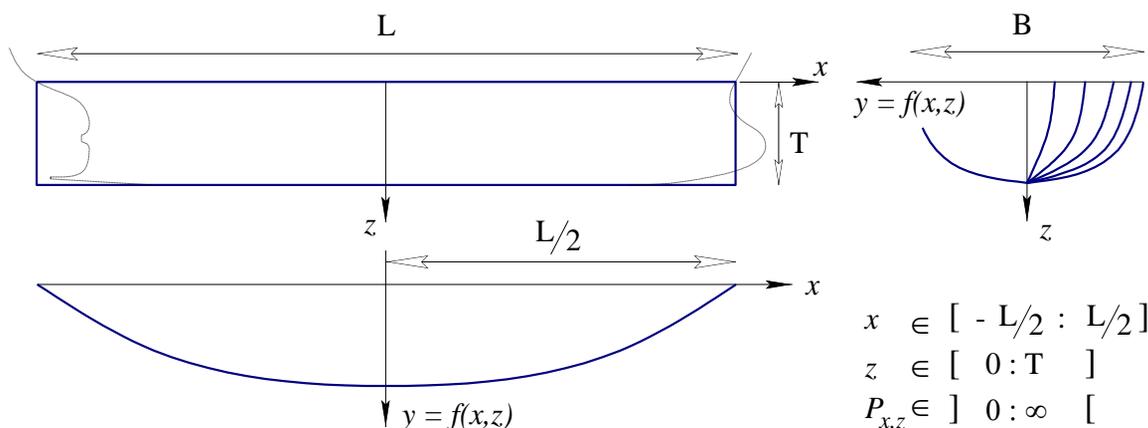


Рис. 6. Область определения и размерения аналитической модели симметричного относительно мидельшпангоута корпуса корабля – КПО - корпус параболических обводов.

Полнота ватерлинии оценивается как: $\alpha = P_x/(1-P_x)$; для мидельшпангоута это: $\beta = P_z/(1-P_z)$, и коэффициент общей полноты $\delta = \alpha \cdot \beta$ (без учета дополнительных заострений ватерлинии и завала/развала бортов).

Из анализа графиков удельного волнового сопротивления (Рис. 7) следует:

1. Увеличение полноты ватерлинии существенно сказывается на удельном сопротивлении при скоростях хода $F_n = 0.4$ и менее;

2. Полнота ватерлиний и шпангоутов мало влияет на величину удельного сопротивления при $Fn \geq 0.5$, при существенном увеличении полноты корпуса удельное сопротивление уменьшается;

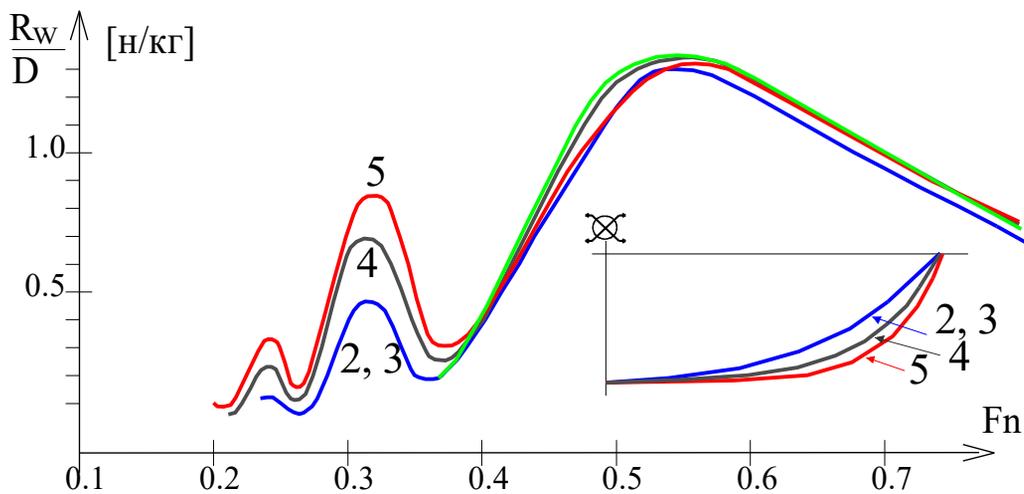


Рис. 7. Расчетные кривые удельного волнового сопротивления, отнесенного к водоизмещению, для симметричного относительно мидельшпангоута параболического корпуса

3. Увеличение полноты мидель-шпангоута приводит к уменьшению удельного сопротивления при скорости $Fn = 0.5$ и практически не влияет на сопротивление при $Fn = 0.3$;

4. Малые смещения экстремумов волнового сопротивления означает, что волнообразующая длина корпуса на степенных функциях слабо зависит от полноты ватерлиний и общей полноты корпуса.

5. «Алымовская» полнота ветвей шпангоутов в оконечностях усиливает корабельное волнообразование, и –усиливается силовое воздействие штормовых волн. Устранение проблемы реализуется «клиперским» (английским) заострением ветвей скуловых шпангоутов в оконечностях (Рис. 5), придание им V-образной формы.

Асимметричный относительно мидельшпангоута корпус

Ассиметричные относительно миделя обводы создаются с использованием «синусоидально-показательных функций», которые охватывают

многообразие обводов от полной синусоиды до бульбовой капли, расширяющейся до формы подводного «крыла ската».

Показатели степени в алгоритме сопрягаются по принадлежности носовой P_s и кормовой P_a оконечностям корпуса. Небольшая корректировка аппликаты носового бульбового расширения выполняется с помощью параметра T_s .

Синусоидально-показательные функции
 Параметры обратной полноты: $P \in [0 \div \infty]$
 $P > 10$ косинусоиды
 $1 < P < 5$ бульбовые ватерлинии
 $P \approx 1$ каплеобразность
 $P < 0.5$ к форме крыла ската
 $P_s = 1.2$ форштевень
 $P_a = 1.2$ ахтерштевень
 Заглубление $T_z = 0.50 \in]0 \div 1]$
 Наклон борта $K_s = 0.80$ развал > 1 $>$ завал

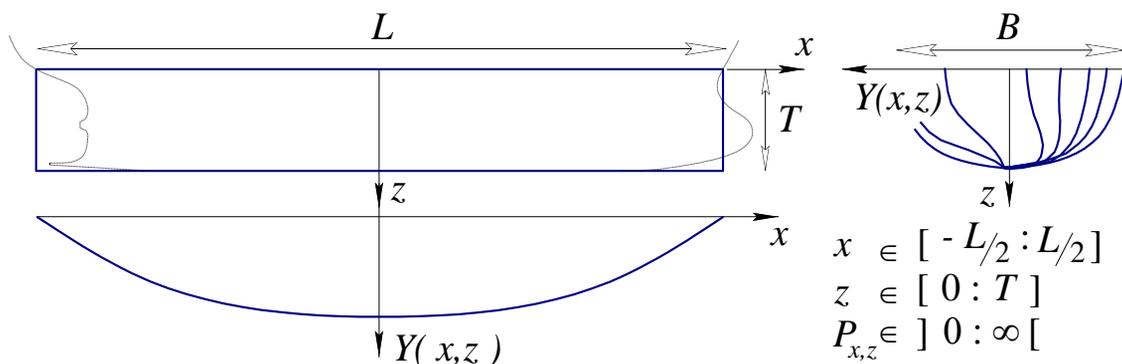


Рис. 8. Система координат и линии чертежа асимметричного корпуса

С помощью параметра K_s настраивается аналогичный развал $K_s > 1$ или завал борта $K_s < 1$ в средней части корпуса.

$$Y(z, x) = B \cdot \frac{(1-z)^{2+8/(P_a+P_s)}}{1+P_a^{-1}+P_s^{-1}} \cdot (1+\cos \pi x) \times \\ \times (1+(P_s \cdot (1-x))^{-z \cdot T_z^{-1}} + (P_a \cdot (1+x))^{z \cdot T_z^{-1}}) \cdot (1+(1-K_s) \cdot z)$$

В зависимости от параметра P семейство кривых образуют следующие формы ватерлиний:

1. Косинусоиды $P \geq 10$;
2. Бульбовые формы ватерлиний $1 \leq P \leq 5$;
3. Форма капли $P \approx 1$;

4. Форма крыла ската $P \leq 0.5$.

При этом:

1. Увеличение P приводит к заострению ватерлиний в оконечностях и уменьшению бульба. При $P \rightarrow \infty$, корпус описывается косинусоидами по ватерлиниям и параболами по шпангоутам;

2. Уменьшение P приводит к глубокопогруженному развитому бульбу, с тенденцией к форме “крыло ската”. Ахтерштевень превращается в подобие “плавника”. Увеличивается коэффициент общей полноты и смоченная поверхность корпуса;

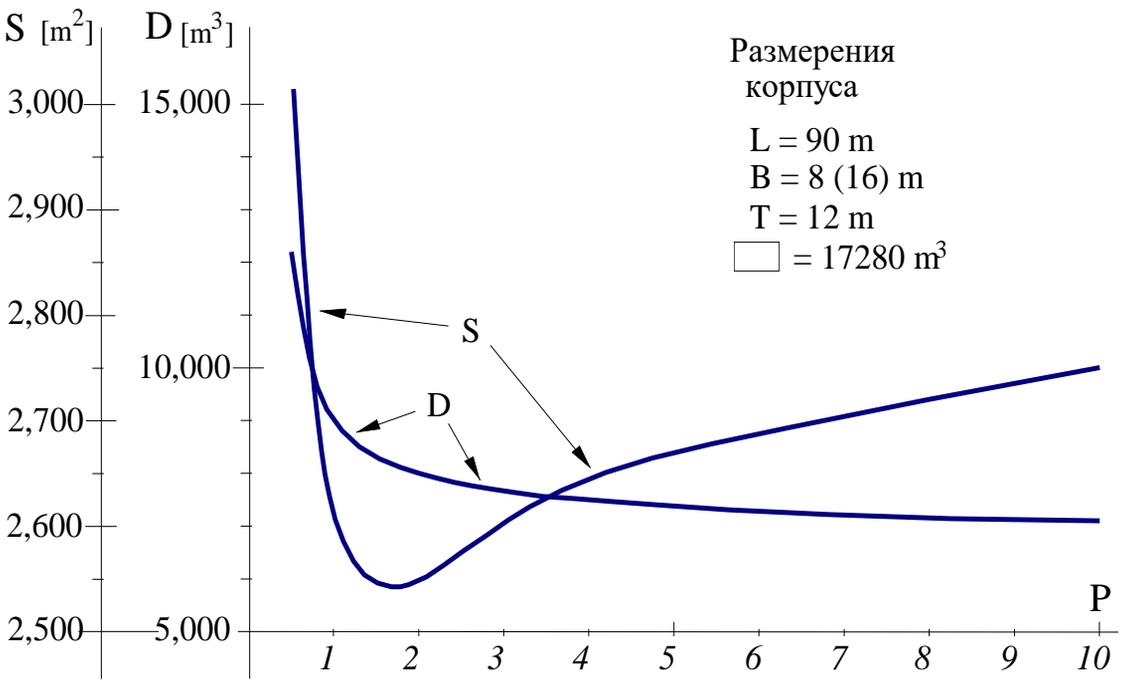


Рис. 9. Кривые водоизмещения (D) и смоченной поверхности (S) в зависимости от параметра P асимметричной модели

3. Оптимальное соотношение между объемом корпуса и площадью смоченной поверхности (Рис. 9) при $P \cong 1,5$ ($Ch(1.0)=1.54308$).

Из анализа графиков удельного волнового сопротивления (отношения волнового сопротивления к водоизмещению, Рис. 10) следуют выводы:

1. Применение носового бульба отчасти влияет на удельное волновое сопротивление на скорости хода порядка $F_n \approx 0,3$. При этом большая пол-

нота действующей ватерлинии не приводит к значительному увеличению сопротивления, которое наблюдалось у корпусов с симметричными параболическими обводами;

2. Если параметр $P \geq 1.5$, то удельное сопротивление на скорости $F_n = 0,3$ снижается;

3. Если $P < 1.5$, то применение кормового бульба приводит к росту удельного сопротивления на $F_n = 0.3$, но сравнимо меньше, чем у корпусов с параболическими обводами;

4. Корпус с экспоненциально тригонометрическими обводами (КЭТО) показывает худшую ходкость на скорости $F_n=0.5$ в сравнении с симметричными параболическими корпусами (КПО);

5. Можно также отметить, что носовой бульб уменьшает относительную разность между экстремумом удельного сопротивления на $F_n = 0.3$ и минимумом сопротивления на $F_n \approx 0.35$, что проявляется усилением расходящейся корабельной волны.

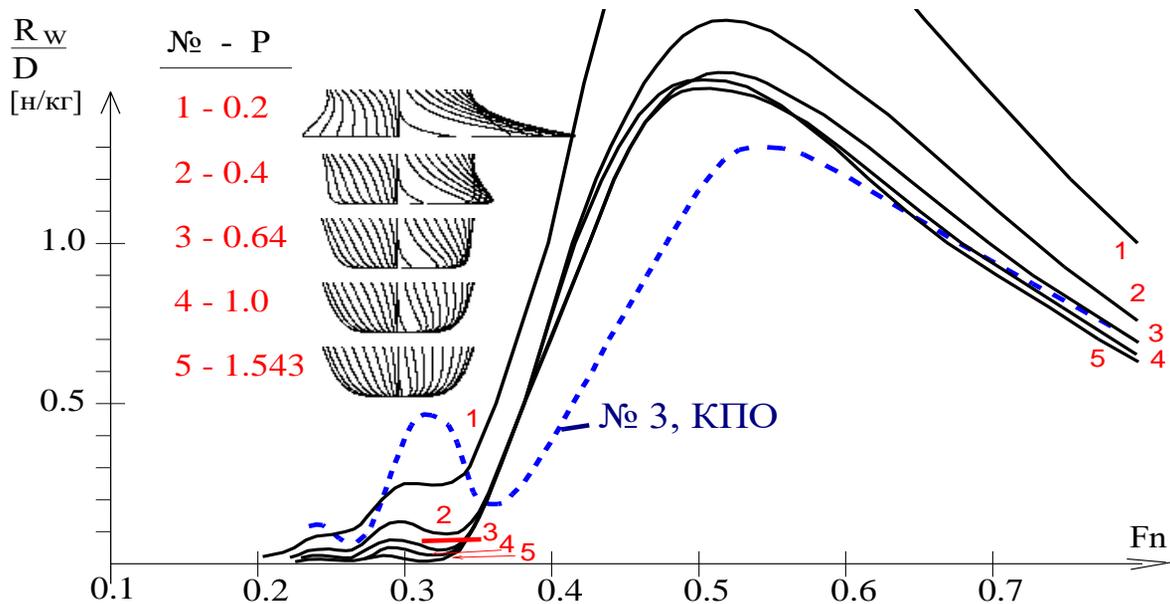


Рис. 10. Расчетные кривые удельного волнового сопротивления для несимметричного корпуса с экспоненциально-тригонометрическими обводами. Синим пунктиром показан расчёт для корпуса с параболическими обводами, отмеченной под № 3 в предыдущей серии.

Условно оптимальным по минимуму волнообразования на скорости хода $Fn = 0.5$ корпус получается с параметром $P = 1,0$.

Штевни

Бульбовый форштевень и консоль кормового подзора настраиваются по сопутствующему запросу: «Описание штевней», где также можно переопределить главные размерности корпуса: длину (L), ширину (B) и осадку (D). N_s – создаёт плавную стыковку бульбового очертания с основной линией;

Описание штевней	
Наклон форштевня F_s $[-1 \div 1]$	$= 0.00$
Заглубление бульба T_s $[0.5 \div 1]$	$= 0.75$
Длина носового бульба L_s $[0 \div 0.5]$	$= 0.10$
Степень кривизны N_s $[1 \div \approx 2]$	$= 1.67$
Длина кормового подзора L_a $[0 \div 0.5]$	$= 0.15$
Крутизна подзора N_a $[1 \div \approx 2]$	$= 1.60$
Длина корпуса Length	$= 123.74$
Ширина Breadth	$= 16.80$
Осадка Draught	$= 6.40$

Выступ консоли кормового подзора L_a отсчитывается от точки на киле, а крутизна N_a – условный угол пересечения ахтерштевня с ватерлинией связан с выступом плавникового ахтерштевня и величиной наклона поверхности обшивки под кормовой раковиной:

$$X(z) = L \cdot L_a \cdot \sin(2.25 \cdot \tanh(z \cdot N_a)) \cdot (z + 2) / 6$$

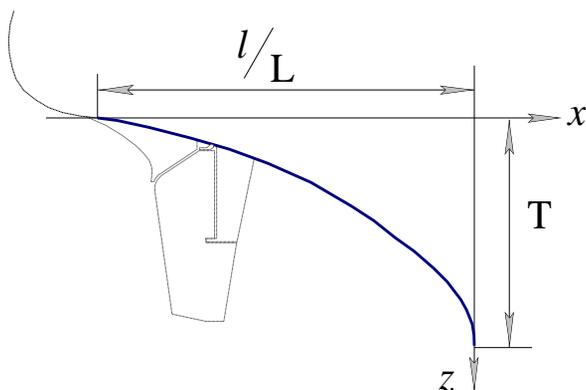


Рис. 11 Описание кормового подзора с помощью эллипса.

Построение форштевня $X(z)$ использует принудительный наклон F_s относительно образующей прямой линии, с указанием аппликаты заглубления T_s и длины L_s выступающего вперёд носового бульба. Степень кривизны N_s предопределяет изгиб форштевня на уровне конструктивной ватерлинии.

$$X(z) = \frac{L}{2} \cdot \left(1 + \frac{1 - F_s \cdot (1 + z) / 2}{1 + L_s} \times \left(1 + L_s \cdot \left[z < 0 ? z^2 \cdot (1 - L_s) : \left(\frac{|z|}{T_s} \right)^{T_s \cdot N_s / (1 - T_s)} \cdot \left(\frac{1 - z}{1 - T_s} \right)^{N_s} \right] \right) \right),$$

где $z < 0$ – надводный борт с параболическим контуром форштевня, знак вопроса: ? – оператор выбора в языке программирования С.

Включение и масштабирование ватерлиний $Y(x)$ по уровням аппликаты z в интервале между штевнями придает корпусу внешне привычный облик, но, с эквидистантными контурами ватерлиний.

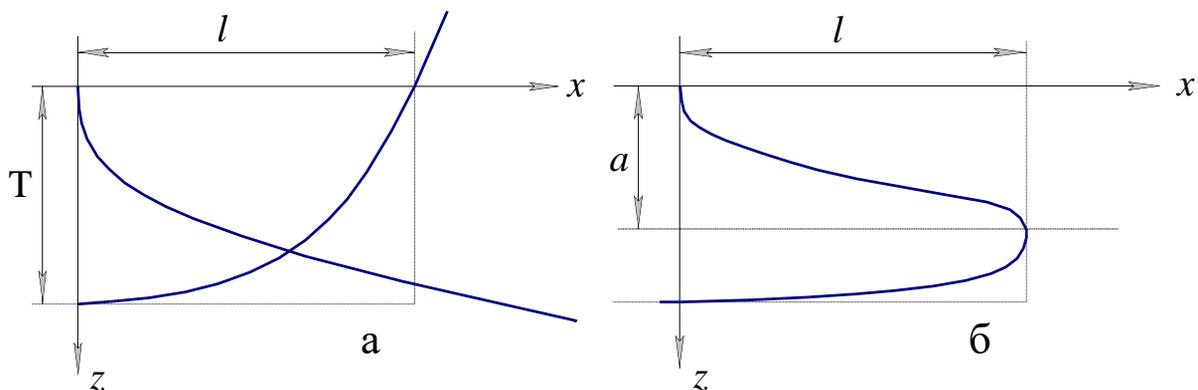


Рис. 12. Функции, образующие форштевень (а), и их произведение (б).

То есть, в обводах отсутствуют придонные сужения контуров шпангоутов в зонах носовых и кормовых скул, отвечающих за создание оптимальных условий по корабельному волнообразованию и минимизации силовых воздействий в процессе отражения штормовых волн от корпуса на ходу корабля.

Кривые элементов теоретического чертежа и диаграммы устойчивости в диапазонах осадок интенсивной вертикальной качки

Расчёты гидростатики и устойчивости выполняются в программе «Null» по традиционным [6] руководствам из учебника теории корабля, что необходимо для корректного сопоставления новых результатов с привычной или общепринятой корабельной документацией.

Процедура <F5> для расчётов гидростатики и устойчивости открывается в новом окне «Ship Hull Hydrostatics», где слева-вверху изображается проекция «корпус» теоретического чертежа (Рис. 13) с рассечением подводного и надводного объемов пятью контрольными ватерлиниями.

Для выполнения гидростатических расчётов в рамках стандартных (или исторических) методик, по исходной цифровой модели корпуса корабля предварительно проводится интерполяция ординат бортовой обшивки на равномерную расчетную сетку таблицы плазовых ординат. При определении теоретических контуров в качестве функций от вертикальной аппликаты нельзя работать с неоднозначными параметрическими построениями шпангоутов и штевней. При указанной инженерной преемственности в программе «Null» выполняется отбор наибольших ординат при очерчивании шпангоутных контуров в функции аппликаты от киля к па-

Stability Гидростатика и устойчивость классика Семёнова Тянь-Шанского.

F1 эта краткая справка

F4 параметры диаграмм устойчивости

<Enter> обновление изображения

<Esc> выход

~~~~~

V грузовой размер, водоизмещение

S площадь смоченной обшивки

Swl площадь действующей ватерлинии

xS абсцисса площади ватерлинии

xC абсцисса центра величины

zC аппликата центра величины

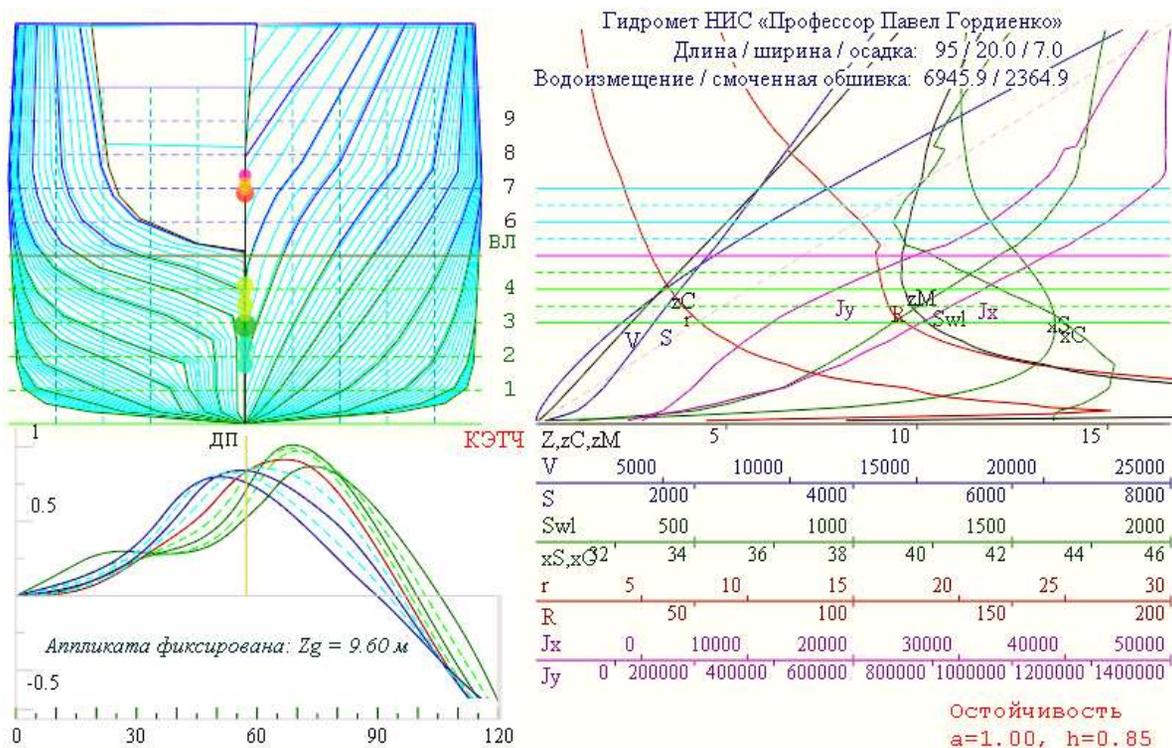
zM аппликата метacentра

r, R поперечный (x) и продольный (y) метacentрические радиусы

Jx, Jy поперечный и продольный моменты инерции площади ватерлинии

лубам, отчего корпус дополняется объёмами за бортовыми килями, под прогибами кормовых тоннелей, за планширями фальшбортов и др.

Океанский корабль повышенной штормовой мореходности не может быть многокорпусным, и не строится в сильно искривленных поверхностях с обратной кривизной, где однозначно возникают гидродинамические удары со слемингом и разрушительными нагрузками, и потому гидростатические расчёты в программе «Hull» считаются приемлемыми и достоверными для традиционных всепогодных морских судов неограниченного района плавания.



**Рис. 13. Вариант расчёта гидростатических кривых и диаграмм остойчивости научно-исследовательского судна «Профессор Павел Гордиенко».** При нулевой начальной остойчивости на конструктивной осадке внешние кренящие моменты малы примерно до  $15^\circ$  волнового склона. На чертеже корпуса и на кривых элементов теоретического чертежа приведены линии осадок, по которым построены диаграммы остойчивости при фиксированном положении центра тяжести.

В вычислительном эксперименте «Aurora» геометрические построения ведутся с параметрическими контурами или объёмными интегралами в векторной форме, что исключает аналогичные погрешности, и в том числе позволяет работать с многокорпусниками.

На графическом экране теоретический чертеж корабля в проекции корпус изображается левее гидростатических кривых в том же вертикальном масштабе (Рис. 13) с общими горизонталями ватерлиний. Между исходными шпангоутами светло-голубыми ветвями прорисовываются переинтерполированные контуры, участвующие в расчётах, и по которым можно визуальнo оценивать корректность применения в расчетах обычных таблиц плазовых ординат.

На проекции корпус (Рис. 13 – слева-вверху) в диаметральной плоскости корпуса большим зелёным кружочком отмечается центр величины по конструктивной осадке, у других контрольных осадок синеватый оттенок при всплытии и желтоватый – для погружения корпуса; самые маленькие точки соответствуют промежуточным осадкам. Аналогично показываются аппликаты метацентров, только красным кружочком чуть меньшего размера, с такими же цветовыми оттенками и чуть меньшими размерами для других контрольных ватерлиний.

Кривые элементов теоретического чертежа приводятся в правой части графического окна (Рис. 13 – гидростатические кривые), где приводятся основные и промежуточные горизонтالي контрольных ватерлиний. Разметка кривых выполняется по всей высоте: от нижней точки на киле, до палубы и выше. Слева–внизу – графики диаграмм остойчивости с указанием метода отсчета положения центра тяжести: над центром величины; над действующей ватерлинией; относительно метацентра – метacentрическая высота одинаковая для всех осадок; и над основной линией – фиксированное положение центра тяжести при вертикальной качке на

волнении, характерное для реальной динамики корабля в штормовом море.

Справа внизу красным цветом подписываются текущие отсчеты под курсором мыши, с указанием названий графических секторов экрана: «Корпус», «КЭТЧ» (кривые элементов теоретического чертежа) и «Остойчивость».

Выбор количества контрольных ватерлиний, максимальный угол диаграммы остойчивости и форма

| Диаграмма Рида            |      |
|---------------------------|------|
| ЦТ над центром величины   | 0.00 |
| Максимальный угол крена   | 180° |
| Выбор ватерлиний с 2 по 8 |      |

представления результатов настраиваются в меню по команде: **<F4>** – «параметры диаграмм остойчивости», в меню, появляющемся правее диаграмм остойчивости.

По первой строке выбирается вариант формирования диаграмм остойчивости, где предустанавливается величина отстояния центра тяжести для исходной конструктивной осадки:

«*ЦТ над центром величины*» – диаграмма остойчивости формы корпуса – оценка эффекта действия наклонной поверхности волн;

«*Метацентрическая высота*» – остойчивость без учета изменения осадки – условия постоянного действия восстанавливающих/кренящих моментов;

«*Относительно ватерлинии*» – альтернативная оценка остойчивости, или прямое гидростатическое действие штормовых волн;

«*ЦТ над основной линией*» – практическая остойчивость для реальных условий штормового плавания с фиксированным положением аппликаты центра тяжести корабля.

Во второй строке можно ограничивать максимальный угол для прорисовки диаграмм остойчивости; в нижней строке указывается интервал контрольных ватерлиний, по которым следует проводить вычисления.

Внешний цикл гидростатических расчётов с построением графиков кривых элементов теоретического чертежа (КЭТЧ) выполняется по единому аргументу – аппликате.

Результаты удобно иллюстрировать в масштабе теоретического чертежа корпуса корабля, с отметкой расчетных ватерлиний общей горизонталью (Рис. 13).

По этим же горизонталям осадок слева внизу строятся диаграммы Рида (графики поперечной остойчивости).

На графиках правее проекции корпуса теоретического чертежа размечаются 12 кривых элементов гидростатических величин в зависимости от осадки:

$Z$  [м] – аппликата, используется для перекрестной выборки;

$z_C, z_M$  [м] – аппликаты центра величины и метацентра;

$V$  [м<sup>3</sup>] – грузовой размер, водоизмещение погруженного в воду части корпуса;

$S$  [м<sup>2</sup>] – смоченная поверхность бортовой обшивки;

$S_{wl}$  [м<sup>2</sup>] – площадь действующей ватерлинии;

$x_S, x_C$  [м] – абсциссы центра площади ватерлинии и величины корпуса;

$r, R$  [м] – поперечный и продольный метацентрические радиусы;

$J_x, J_y$  [м<sup>4</sup>] – поперечный и продольный моменты инерции площади действующей ватерлинии;

При интегрировании повсеместно используется метод трапеций, для которого не существует числовых выбросов при сильных искривлениях поверхностей на неравномерных расчётных сетках, и не ожидается неадекватных результатов даже в случаях применения оцифровок с явными недочётами, излишними данными или погрешностями в оцифровке исходной геометрии корпуса корабля.

Площадь ватерлинии:

$$S(z) = \int y(z)dx. \quad [M^2] \quad (1)$$

Продольный статический момент инерции площади ватерлинии:

$$Mx(z) = \int x \cdot y(z)dx. \quad [M^3] \quad (2)$$

Момент инерции площади ватерлинии по продольной и поперечной осям:

$$Jx(z) = \int y^3(z)dx; \quad Jy(z) = \int x^2 \cdot y(z)dx \quad [M^4] \quad (3)$$

Абсцисса центра площади ватерлинии для текущей осадки:

$$Xf(z) = Mx(z) / S(z). \quad [M] \quad (4)$$

Объёмное водоизмещение:

$$V(z) = \int_0^z S(x)dz. \quad [M^3] \quad (5)$$

Статические моменты площадей ватерлиний относительно аппликаты и продольной оси:

$$Cz(z) = \int_0^z z \cdot S(z)dz.; \quad Cx(z) = \int_0^z Mx(z)dz. \quad [M^4] \quad (6)$$

Координаты центра величины по абсциссе и аппликате:

$$Xc(z) = Cx(z) / V(z); \quad Zc(z) = Cz(z) / V(z). \quad [M^4] \quad (7)$$

Поперечный  $r$  и продольный  $R$  метацентрические радиусы:

$$r = Jx(z) / V(z); \quad R = Jy(z) / V(z). \quad [M] \quad (8)$$

Аппликаты поперечного и продольного метацентров:

$$zm = Zc + r; \quad zM = Zc + R. \quad [M] \quad (9)$$

Площадь смоченной поверхности бортовой обшивки:

$$iS(z) = S(0) + \int_0^z (\int \sqrt{1 + \delta y_x^2 + \delta y_z^2} dx) dz, \quad [M^2] \quad (10)$$

где:  $S(0)$  – площадь днища при аппликате  $z = 0$ ,  $\delta y_x$  и  $\delta y_z$  – разности ординат по элементарным ячейкам бортовой обшивки.

Для общего повышения точности интегрирования таблицы ординат дополняются описанием штевней, с возможностью оконтуривания палуб и надстроек. Штевни представляются парой пространственных кривых с общим аргументом по аппликатам: в диаметральной плоскости корпуса; и в расширениях по ординатам, для уточнения транцевых или скругляемых объёмов в оконечностях корпуса.

Абсцисса центра площади в оконечных трапециях уточняется по отношению штевня от ближайшего к нему расчётного шпангоута:

$$C_x = x + \frac{(S_x - x) \cdot (y + 2 \cdot S_y)}{3 \cdot (y + S_y)}, \quad [M] \quad (11)$$

где:  $x, y$  – абсцисса и ордината ближайшей к штевню точки на шпангоуте,  $s_x, s_y$  – координаты на той же ватерлинии на срезе штевня.

Для вычисления диаграмм остойчивости проводится аналогичный расчет водоизмещений, моментов инерции площадей ватерлиний и метацентрических радиусов для всего диапазона осадок при последовательном увеличении углов крена. Затем выполняется интерполяция к условно расчётной осадке для требуемого водоизмещения, и по полученному аргументу восстанавливаются необходимые величины к диаграммам остойчивости.

Формально диаграммой остойчивости является нечетная функция чистой синусоиды, угол касательной к которой в точке нулевого угла крена определяется метацентрической высотой, как линией проходящей через величину плеча остойчивости на отсчёте угла крена в один радиан.



ошибок, либо сопровождаться оговорками об опасностях, связанных с пущей востребованностью по иным проектным предпосылкам, с должной проработкой необходимых по таким случаям наставлений по безопасности для мореплавателей.

Диаграммы остойчивости с нулевой начальной метацентрической высотой характеризуют чисто геометрические качества корабельного корпуса, и, видимо, нежелательно чтобы ветви кривых остойчивости опускались в отрицательную зону при любых углах крена, что иначе будет являться важным предупреждением опасности непредвиденного и мгновенного опрокидывания корабля в штормовом плавании, или при незначительных повреждении герметичности корпуса.

По умолчанию блок диаграмм остойчивости строится для фиксированного по аппликате центра масс корабля, из расчета, что на контрольной осадке центр тяжести приведён к аппликате метацентра, что соответствует нулевой начальной остойчивости. Такой вариант построения ветвей диаграмм остойчивости с фиксированным положением центра масс для различных осадок необходим для быстрой оценки безопасности штормового плавания корабля в условиях интенсивной бортовой и вертикальной качки.

В алгоритмах программы Hull плечи остойчивости строятся относительно нулевой точки на уровне конструктивной ватерлинии, и тогда запросы в построении диаграмм остойчивости строятся с использованием интерполяции по предварительно рассчитанной двумерной матрицы в зависимости от углов крена  $\vartheta$  и водоизмещения относительно равнообъемной начальной осадки  $z$ .

«*Метацентрическая высота*» – с фиксацией снижения центра тяжести относительно мгновенного метацентра  $z_m$  на величину  $Z_m$  выполняется оценка остойчивости формы корпуса для различных проектных осадок при строго одинаковой величине начальной остойчивости:

$$l(\vartheta) = l_0(\vartheta, z) - (zm(\vartheta, z) - Zm) \cdot \sin(\vartheta). \quad [M] \quad (12)$$

«ЦТ над центром величины» – вариант фиксации центра тяжести на величину  $Zm$  относительно мгновенного центра величины  $Zc$  в условиях крена  $\vartheta$  и вертикальной качки  $z$  характеризует проектные качество формы корпуса и запас остойчивости при больших углах наклонения:

$$l(\vartheta) = l_0(\vartheta, z) - (Zc(\vartheta, z) + Zm) \cdot \sin(\vartheta). \quad [M] \quad (13)$$

«Относительно ватерлинии» – альтернативная оценка остойчивости при расположении центра тяжести относительно действующей ватерлинии необходима для проектных оценок начальной остойчивости корабля при относительно малых углах крена

$$l(\vartheta) = l_0(\vartheta, z) - (z(\vartheta) + Zm) \cdot \sin(\vartheta), \quad [M] \quad (14)$$

где:  $z$  – расчётное значение осадки при равнообъёмном наклонении корпуса.

«ЦТ над основной линией» – практическая остойчивость с фиксированным положением аппликаты центра тяжести корабля – как ключевая характеристика мореходности корабля в условиях интенсивной штормовой качки:

$$l(\vartheta) = l_0(\vartheta, z) - (T + Zm) \cdot \sin(\vartheta), \quad [M] \quad (15)$$

где:  $T$  – фиксированная расчётная или конструктивная осадка корабля.

### ***Интенсивность корабельного волнообразования в расчётах волнового сопротивления движению корабля***

Гидромеханика корабля и особенности его взаимодействия с внешним волнением адекватно описывается в рамках математической модели Мичелла [13], с возможностью уточнения по Кочину [5] для частичного

учёта ширины корпуса и углов вхождения (и схождения по корме) ватерлиний.

Оценочные расчёты корабельного волнообразования и волнового сопротивления формально позволяют оценивать интенсивность силового воздействия крупных штормовых волн, которые в математической модели Мичелла представляются спектром набегающих на корабль с последующим отражением от корпуса корабельных волн в

диапазоне длин:  $\lambda \in [0 \div \Lambda = 2 \cdot \pi \cdot V_0^2 / g]$ , что соответствует первой половине фазового угла:  $\vartheta \in 0 \div \pi/2$ , тогда как недостающая четверть горизонта:  $\vartheta \in \pi/2 \div \pi$  составляет «внешнюю волну» в равномерном белом спектре, или – сплошном встречном потоке.

Или иначе, если в движении на корпусе корабля порождаются корабельные волны с ярком выраженными периодами, то штормовая волна с такими же характеристиками будет оказывать наиболее сильное силовое (энергетическое) воздействие в процессе килевой и бортовой качки, ассоциируемых с поперечными и расходящимися корабельными волнами, соответственно.

Тогда оптимизационным критерием штормовой мореходности становится снижение интенсивности корабельного волнообразования и волнового сопротивления на всех скоростях хода, включая закритически высокие, например до величин  $Fn \leq 0,8$ , с минимизацией интенсивности по всему спектру периодов корабельных волн, соизмеримых по характеристикам со штормовым волнением в заданном районе плавания корабля.

**Wave** Волнообразование и сопротивление движению корабля на тихой воде.

F1 краткая справка

F7 по «Штормовой мореходности»

F8 из Корабелки + А. Н. Шебалов

F9 ++ остаточное от А. Ш. Готман

(LMouse) + волновое излучение

<Space> сброс профилей волн

<Enter> обновить изображение

<Tab> иная модель Мичелла

<Esc>/<ctrlC> завершение

Простейшие оценки суммарной интенсивности корабельного волнообразования опираются на анализ эффектов интерференции поперечной компоненты волны вдоль корпуса корабля. Вне зависимости от формы корпуса за кормой корабля образуется регулярная система поперечных корабельных волн, длина и период которых строго связаны со скоростью хода корабля:  $\lambda_w = V_0^2 \cdot 2\pi/g$ ;  $\tau_w = V_0 \cdot 2\pi/g$ . Визуальное сопоставление расстояний между гребнями волн  $\lambda$  и длиной корабля  $L$ :  $(\lambda/L) = V^2 / L \cdot 2\pi/g$ , определяет критерии относительной по корабельному волнообразованию скорости хода, как критерий Фруда:

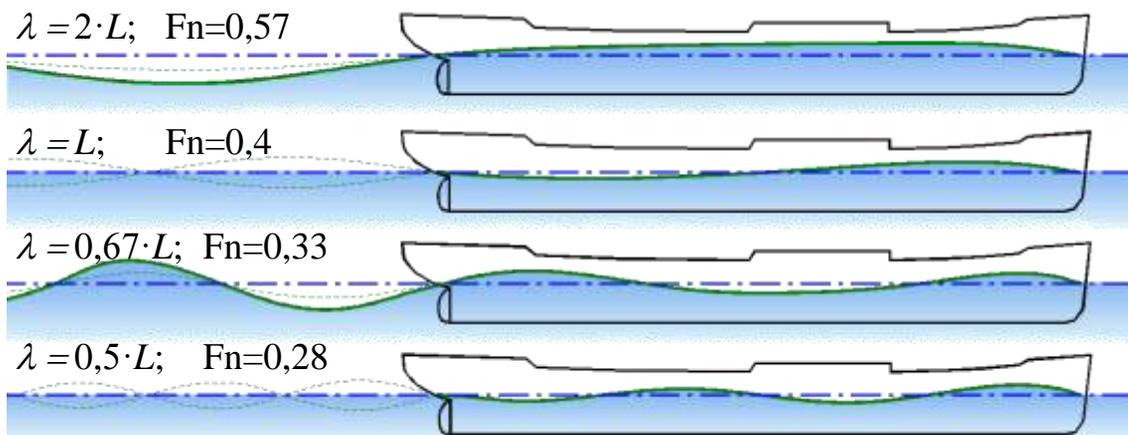
$$Fn = V/\sqrt{g \cdot L},$$

из которого следует видимая форма излучаемой волны с максимальной длиной:

$$(\lambda/L) = 2\pi Fn^2$$

или

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



**Рис. 15. Характерные режимы** волнообразования при различных скоростях движения судна  $V \approx 1.25 \cdot \sqrt{(\lambda/L) \cdot L} = 1.25 \cdot \sqrt{\lambda}$  [м/с].

При длине поперечной корабельной волны строго равной длине корпуса, может ожидать наиболее благоприятная интерференция носовой и кормовой систем волн.

Однако на практике реальная волнообразующая длина корпуса всегда меньше, отчего искомый минимум волнового сопротивления уменьшается со значения  $Fn \approx 0,4$  до  $Fn \approx 0,32-0,36$ , соответствующий рост волнообразования на скорости хода при  $Fn \geq 0,57$  обычно соотносят с  $Fn \geq 0,5$ .

Рис. 15 иллюстрирует интерференцию поперечных корабельных волн, условно зарождающихся на форштевне и ахтерштевне. В реальности носовая подпорная волна зарождается в районе скулы, а снижение уровня воды в кормовой части корпуса проявляется в районе кормовой раковины и винто-рулевого комплекса, что обязательно необходимо учитывать при проектировании обводов корпуса. На больших скоростях хода, при  $Fn > 0,4$ , в кормовой части корпуса проявляется сильное проседание уровня воды, и под действием носовой подпорной волны образуется ходовой дифферент на корму. При дальнейшем увеличении скорости судно как бы начинает толкать перед собой «гору» воды, отчего быстро растет как интенсивность корабельного волнообразования, так и волновое сопротивление движению корабля.

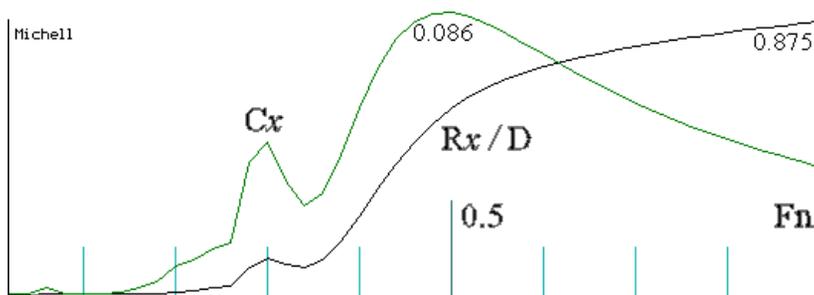
Эффект неблагоприятной интерференции носовой и кормовой систем корабельных волн может быть частично скомпенсирован специальной формой корпуса, ключевым элементом которой должен являться завал бортов на уровне действующей ватерлинии в средней части корпуса.

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

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

где:  $R_w$  – волновое сопротивление [Н];  $\rho$  – плотность жидкости [кг/м<sup>3</sup>];  $V$  – скорость хода судна [м/с];  $S$  – площадь смоченной поверхности корпуса [м<sup>2</sup>].

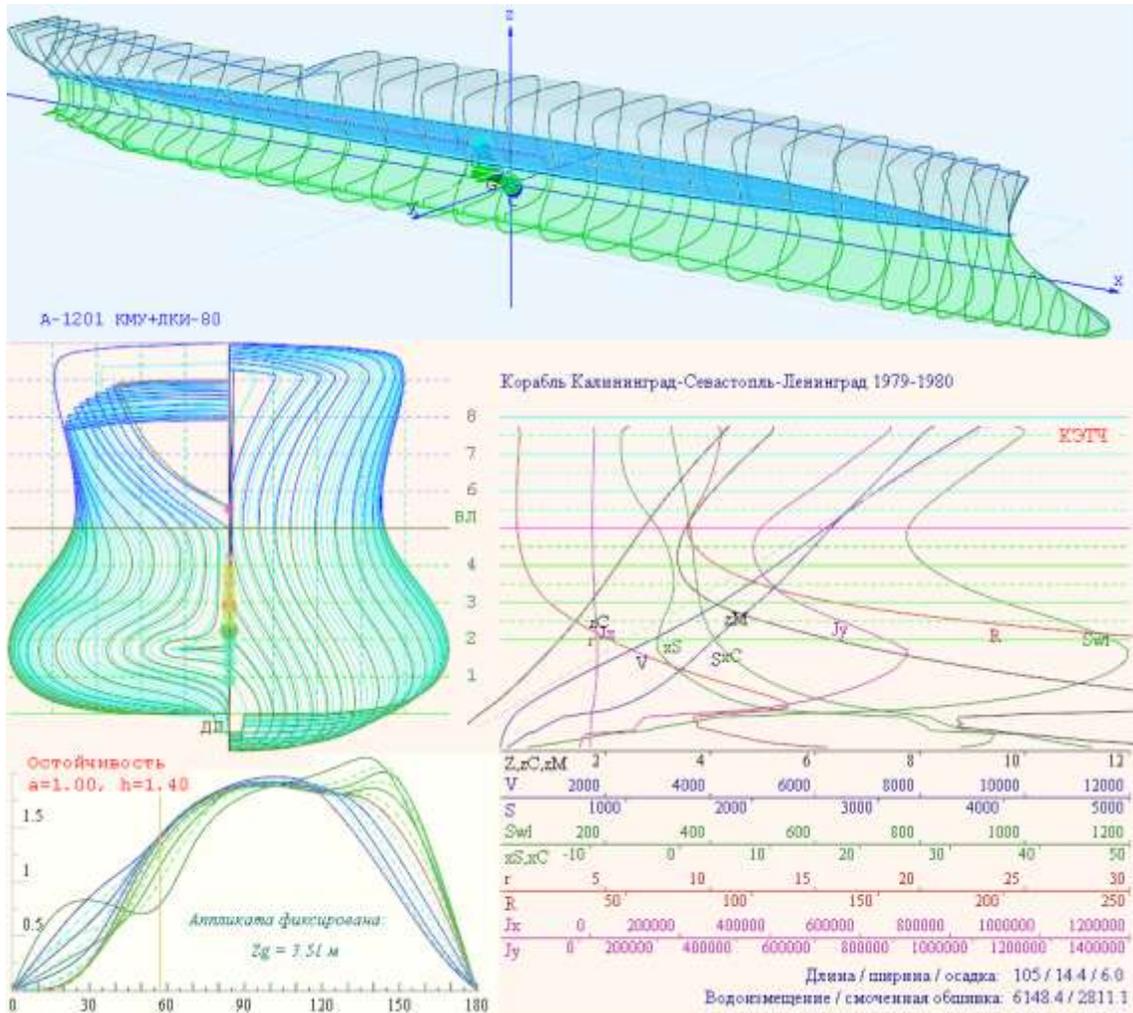
Для оценки формы корпуса и волнового сопротивления иначе можно пользоваться размерной величиной удельного сопротивления, отнесенного к водоизмещению корабля:  $R_w/D$ , где  $D$  – водоизмещение [кг]. Обе оценки  $C_w$  и  $R_w/D$  зависят от соотношений размерностей корпуса, и для сопоставления результатов необходимо приведение моделей к строго одинаковым размерениям. Вполне корректно для сравнения использовать только формы расчётных кривых вдоль оси относительных скоростей хода по Фрудру, предварительно нормированных на расчётные величины для скоростей  $Fn = 0,5$ .



**Рис. 16.** Характерная форма и расчётные оценки волнового сопротивления для хорошо обтекаемого корпуса корабля.  $C_x$  – коэффициент сопротивления;  $R_x/D$  – удельное сопротивление. Хорошо видны экстремумы сопротивления при неблагоприятной интерференции носовой и кормовой систем поперечных волн, возникающей на скоростях хода при  $Fn \approx 0,5$  (0,57) и  $Fn \approx 0,3$  (0,33). Полного гашения волнового сопротивления при  $Fn \approx 0,26$  (0,28) и  $Fn \approx 0,35$  (0,4) не происходит, что объясняется затратами энергии на зарождение системы расходящихся волн.

Если тихоходное судно ( $Fn \leq 0,2$ ) обладает хорошо обтекаемым корпусом, его волновое сопротивление будет пренебрежимо малым.

По эвристическим оценкам, основанным на бионике плавания акулы и рыбы-парусника в открытом океане, создавалась математическая модель корпуса, позволяющая варьировать округлость борта, завал и развал мидельшпангоута, продольную асимметрию полноты корпуса и развитость носового бульба.



**Рис. 17.** Компонентами вычислительного эксперимента являются средства визуализации гидростатических характеристик корпуса и остойчивости корабля, с различными вариантами трёхмерной прорисовки корпуса для анализа проектных решений. Слева, под проекцией корпус показаны кривые остойчивости при различных осадках для нулевой метацентрической высоты при фиксированной аппликации центра тяжести, что соответствует реальной динамике корабля в штормовых условиях. Правее приведен комплекс гидростатических кривых для всех осадок от киля до палубы.

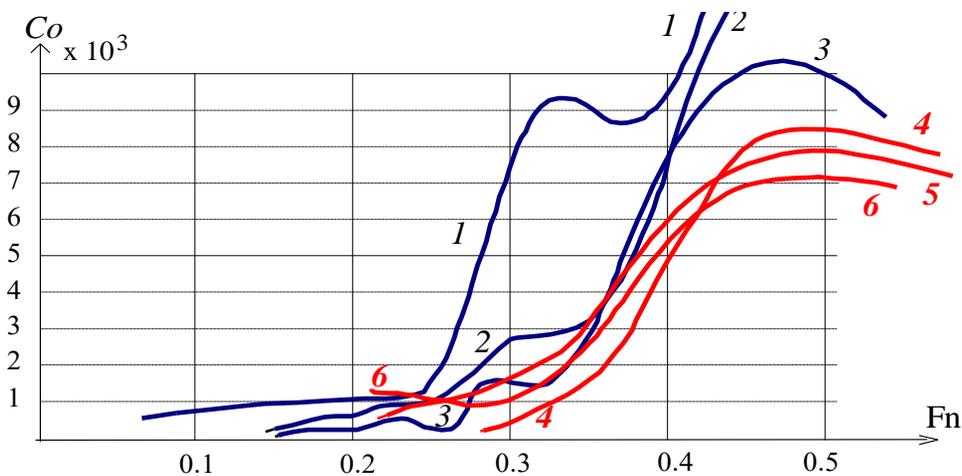
Первые геометрические зарисовки просчитывались в 1976 году на борту РТМС<sup>7</sup> "Багратионовск" в Южной Атлантике, чему способствовало наблюдение за штормованием судов океанского рыбопромыслового фло-

<sup>7</sup> РТМС – рыболовный траулер морозильный – супер, тип «Супер-Атлантик».

та, за необычными мореходными качествами маломерных судов африканских стран, а также, что не менее важно, знакомство с особенностями свободного плавания и активного движения вблизи взволнованной поверхности моря различных животных (подповерхностных рыб, дельфинов и водоплавающих птиц).

Малые модели позволили экспериментально оценить влияние носового бульба, и сделать сопутствующие качественные оценки по штевням и полноте оконечностей для несимметричных относительно мидельшпангоута обводов корпуса.

По крайней мере два удачных (Рис. 17), и не очень, заключения об опытовых испытаниях на тихой воде и волнении предшествовали проектированию большой экспериментальной гипотетической модели для испытаний в 1985 году в опытовом бассейне кафедры теории корабля Ленинградского кораблестроительного института (Рис. 3).



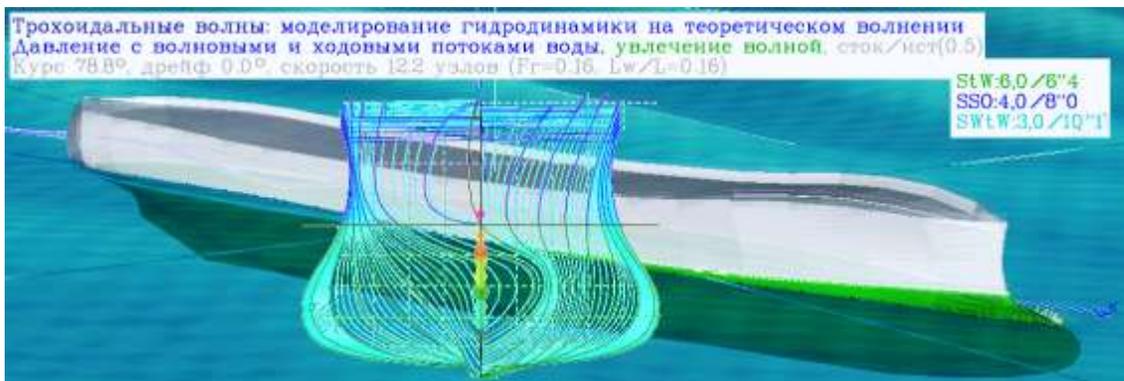
**Рис. 18. Сравнительные кривые коэффициентов остаточного сопротивления моделей.** 1. Эталонная модель «Виктори»; 2. Модель 60-й серии; 3. МИДВ, осадка:  $T=135$  мм; 4. -  $T=125$  мм; 5. -  $\Delta T=40$  мм на корму; 6. - ход кормой вперед; 1÷3 - испытание в гравитационной системе; 4÷6. - на буксировочной тележке.

В испытаниях модель показывала интенсивные расходящиеся волны, порождаемые (по Алымову) в зонах приполненной носовой скулы. Расхо-

дующая корабельная волна затем прекрасно фиксировалась в расчетах волнового сопротивления, показывая ярко выраженный пик на скоростях хода по Фруду порядка  $F_n \approx 0,3$ . Однако в данном случае «клиперские» обводы в оконечностях не устраивались ввиду необходимости проведения опытовых экспериментов в широком диапазоне осадок, отчего все ватерлинии от днища до палубы устраивались по возможности эквидистантно.

Экспериментально подтверждались результаты численных расчётов волнового сопротивления (Рис. 18), прогнозирувавших улучшение ходкости на больших скоростях хода при  $F_n \geq 0,5$ , которое достигается за счет завала бортов и уменьшения ширины действующей ватерлинии в средней части корпуса.

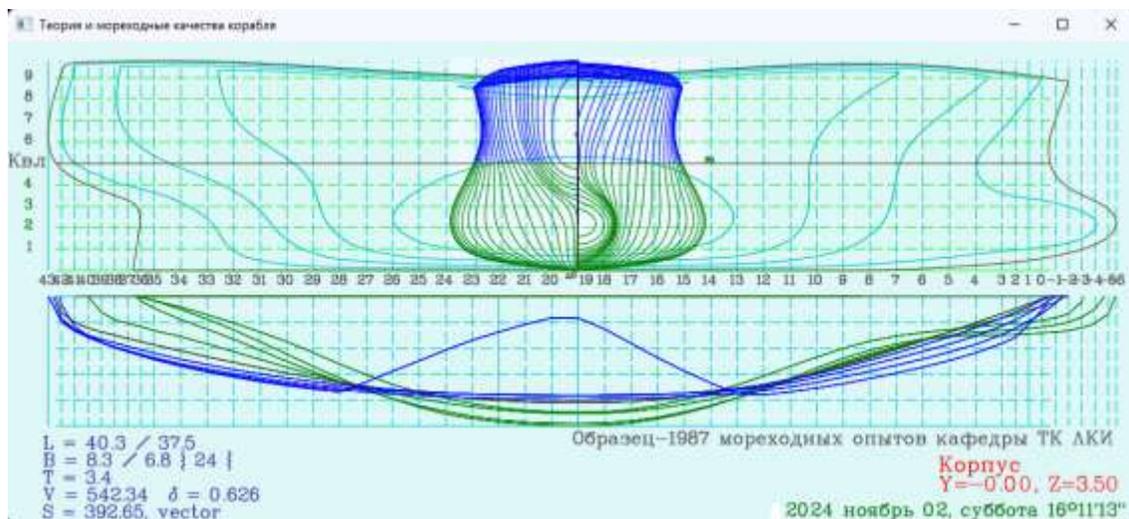
Для наилучших обводов подтверждалась необходимость точки перегиба или максимального угла завала шпангоутов на уровне действующей ватерлинии, особенности прорисовки которого обоснованы патентом России № **2487043**: «[Корабль, устойчивый в штормовом плавании](#)».



**Рис. 19.** Универсальное транспортное судно (А1203-Univer-86) с завалом борта на уровне твиндеков под верхней палубой, представленное руководителю, профессору Александра Николаевичу Холодилину в качестве основного результата мореходных испытаний в опытном бассейне в ЛКИ в 1985 году. Аперриодический режим бортовой качки при нулевой начальной устойчивости; и плавность килевой качки предотвращает заливаемость верхней носовой палубы, несмотря на снижение высоты форштевня, устроенного для предотвращения силового захвата корпуса встречной волной.

Тогда же, уже в процессе экспериментов в опытовом бассейне Ленинградского кораблестроительного института, прорабатывались перспективные обводы для тяжёлого транспортного судна и многоцелевого судна среднего водоизмещения (Рис. 19, Рис. 20).

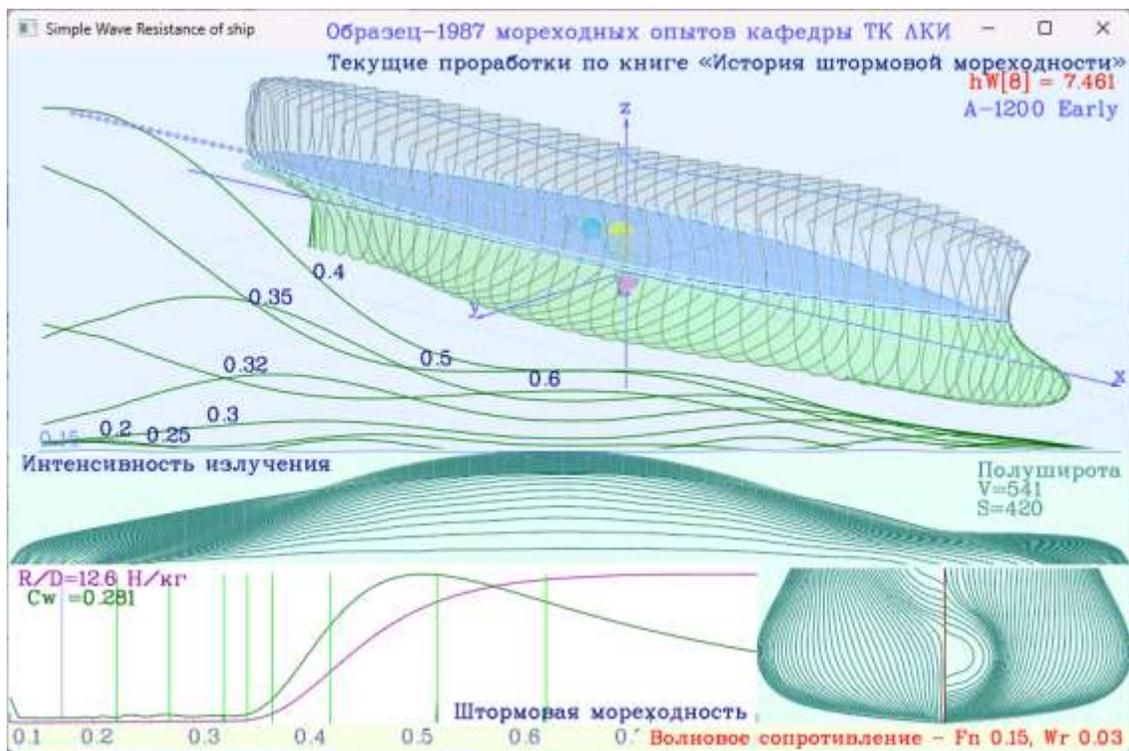
Для гашения расходящейся волны по носовой скуле устроено клиперское (или английское) заострение шпангоутов - придание V-образной формы прикилевым ветвям шпангоутов. Аналогичный принцип использован и по ветвям шпангоутов кормовой скулы, в том числе важно для предотвращения закручивания спутного потока под комовым подзором, в зоне действия винто-рулевого комплекса. Ожидаемый результат оптимизации корабельных обводов (Рис. 20) представлен ниже (Рис. 21).



**Рис. 20. Проработка корабельных обводов по результатам опытовых испытаний с последующей минимизацией корабельного волнообразования во всех спектрах корабельных волн – на всех скоростях хода.**

Физическая интерпретация уравнений для оценок волнового сопротивления корабля становится наглядной, и допускающей геометрические оценки процессов волнообразования и отражения штормовых волн в том случае, если все подинтегральные выражения и аргументы будут записаны в размерном виде. Расчетные интегралы для волнообразования с одной

стороны сингулярные, но сходящиеся, и с другой не терпят разрыва лишь за счет адекватного учёта сильнейшей высокочастотной осцилляции.



**Рис. 21.** Вариант расчётов корабельного волнообразования с представлением графиков относительного сопротивления движению на единицу водоизмещения корабля  $R/D$  [Н/кг], и коэффициентов волнового сопротивления  $C_w$ . Верхние графики показывают интенсивность излучения волн с учётом интерференции вдоль корпуса корабля на различных скоростях хода. Справа-внизу приводятся теоретические шпангоуты, задействованные в алгоритмах интегрирования при моделировании излучения отражённых корпусом корабельных волн. Здесь улучшенные обводы показывают практически идеальный минимум волнообразования на скоростях до  $Fn \leq 0,4$ , и отсутствие значительного роста относительного волнового сопротивления  $R/D$  на скоростях по Фруду более  $Fn > 0,6$ .

В практической гидромеханике, и тем более в природе гравитационных волн на глубокой воде, не может возникать сингулярных разрывов, и тем более исключены какие-либо высокочастотные явления за пределами дисперсионных ограничений с гравитационными волнами на поверхности глубокой воды. И потому, практическая адаптация подинтегральных вы-

ражений с использованием базовых законов гидромеханики, в размерном виде, позволяет своевременно включать в расчёты адекватные асимптотики, либо сводить решения в локальных подобластях к экспериментальным – эмпирическим зависимостям.

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

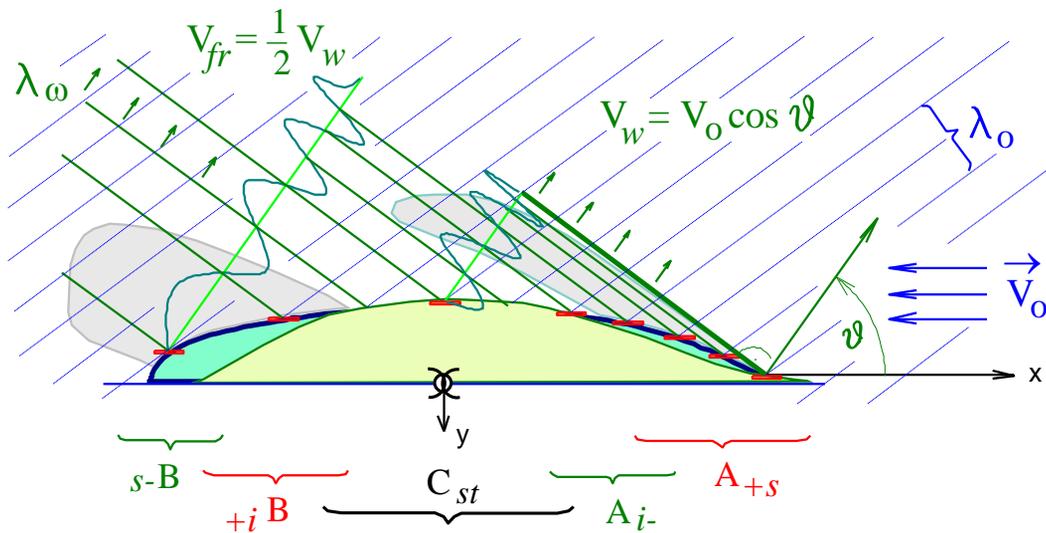
$$A(\lambda) = \frac{M}{\lambda} \cdot \left| \int_{\Omega} q(x_0, y_0) e^{k \cdot (-z_0 + i\omega_0)} \delta\Omega_0 \right| ;$$

$$R_x = -\frac{\pi}{2} \cdot \rho V_0^2 \int_{\lambda}^0 A^2(\lambda) \cdot \frac{\delta \lambda}{\lambda \cdot M^3 \sqrt{M^2 - 1}} .$$
(16)

Безразмерное число  $M = \sqrt{\lambda/L}$  – будет соотношением длин для максимальной поперечной волны  $L$  [м] к расчетной фазовой волне  $\lambda$  [м], рождающейся в процессе интерференции со всеми излучателями волн на смоченной поверхности корабельных обводов. Множитель  $M$  привносит сходящуюся сингулярность порядка  $\lambda^{-1/2}$  даже в случае фиксированной скорости хода, и в теории такой интеграл для амплитуды волны может давать бесконечно большие величины, что никак не может соответствовать жестким ограничениям для крутизны склонов в природе гравитационных трохoidalных волн на воде.

Для контроля корректности гидромеханики волнообразования, все величины в интеграле Мичелла приведены к размерным физическим функциям и аргументам:  $A(\lambda)$  [м] – амплитуда излучаемой корабельной волны заданной длины  $\lambda$ , измеряемая вблизи смоченной обшивки корпуса корабля  $x_0, y_0$ ;  $R_x$  – силовая реакция корабельного волнообразования на

скорости хода  $V_0$ ;  $M = \sqrt{L/\lambda}$  – соотношение длин для максимальной поперечной волны  $L$  к расчетной фазовой волне  $\lambda$ ;  $k = 2 \cdot \pi / \lambda = g / (V_0^2 \cdot \cos^2 \vartheta)$  – волновое число для данной фазовой волны;  $\omega_0 = x_0 / M + y_0 \cdot \sqrt{M^2 - 1} / M$  – фазовый отсчет расходящейся волны с параметром отставания  $M$  для элементарного приращения интенсивности корабельной волны от локального участка корабельной обшивки с координатами  $x_0, y_0$ .



**Рис. 22. Волнообразование**, как процесс отражения волн от поверхности корпуса корабля. В зонах  $A_{+s}$  и  $s-B$  происходит рост гребня трохoidalной волны, неспособной оторваться от корпуса судна.

Механико-геометрическая интерпретация гидродинамических процессов в интеграле Мичелла (Рис. 22) связывает процессы отражения от корпуса корабля внешних волн [49], условно набегающих под косыми углами  $\vartheta$  в диапазоне длин:  $\lambda \in [0 \div L = 2 \cdot \pi V_0^2 / g]$ , где:  $L$  – длина поперечной корабельной волны, соответствующая скорости хода  $V_0$ .

В оконечностях корпуса в зонах:  $s-B$  и  $A_{+s}$  – корабельная волна не может оторваться от корпуса и волновые процессы обращаются сложением коротких волн в форме интенсивного источника – струи жидкости вблизи судовой обшивки.

Тогда, наиболее ответственными участками по длине корпуса становятся зоны  $A_{i-}$  и  $+_iB$ , где происходит трансформация присоединённого гребня в свободно расходящуюся корабельную волну. Если в скуловых обводах корпуса не предусмотрено затягивание гребня волны под днище корпуса, то вблизи корпуса будет формироваться интенсивная расходящаяся волна, в первую очередь свидетельствующая о нарушениях плавности набегающих на корпус потоков воды, со множеством негативных последствий.

В программу «Hull» встроено три алгоритма для работы с корабельным волнообразованием, которые подключаются как извне при запуске, так и изнутри процедуры «Simple Wave Resistance of ship» по командам с клавиатуры:

<F7> – Текущие (условно незавершённые) проработки вычислительного эксперимента из книги [17] «История штормовой мореходности»;

<F8> – Академический алгоритм Ленинградского кораблестроительного института (Корабелки) по Александру Николаевичу Шебалову;

<F9> – Поверенные математические модели и алгоритмы Ады Шоломовны Готман (расчётные кривые по Мичеллу, их главные части и уточнение до остаточного сопротивления).

Независимое графическое окно для процедуры «Wave» разбивается на четыре площадки (Рис. 21):

– справа внизу – проекция корпус подводных обводов корпуса корабля в масштабе моделируемого корабля;

– слева внизу – графики:  $C_w$  – коэффициентов волнового сопротивления и  $R/D$  [Н/кг] – удельного сопротивления на единицу объема водоизмещения. В случае алгоритмов А. Ш. Готман <F9> строятся графики волнового сопротивления по Мичеллу, а также главная часть расчетного интеграла с прогнозом результирующего остаточного сопротивления движению корабля;

– над графиками и шпангоутами располагается проекция полуширота теоретического чертежа, с подписью справа:  $V_{[м^3]}$  – водоизмещение; и  $S_{[м^2]}$  – площадь смоченной поверхности;

– над чертежом полушироты кривые интенсивности корабельного волнообразования вдоль корпуса для заданной скорости хода. Подписи над кривыми соответствуют скорости  $F_n$  по Фруду и отмечаются на вертикалях строго в координатах графиков волнового сопротивления.

– в нижней строке справа красным цветом постоянно обновляются числовые величины с активной площадки под курсором мыши.

По **<F1>** – вызывается краткая справка по командам управления процедурой «Wave».

Курсор мыши всегда репетует значениями координат и величинами в точке его текущего местоположения.

В поле кривых волнового сопротивления курсор активирует маркер – вертикальную линию скорости хода  $F_n$  по Фруду, и соответствующий график интенсивности излучения волн от корпуса корабля над чертежом корпуса в проекции «полуширота».левой клавишей мыши изображение маркера и кривой интенсивностей фиксируются, а новые активные кривые от курсора уже не будут динамически масштабироваться. Чтобы убрать все графики интенсивностей можно воспользоваться клавишей **<Пробел>**.

При изменении размеров окна могут возникать графические огрехи в изображении, которые по команде **<Ввод>** могут быть исправлены путём полного перерасчета. Клавишей **<Tab>** можно последовательно изменять выбор метода вычислений **<F7><F8><F9>**.

## II. «AURORA» – ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ИЛИ ОПЫТЫ ШТОРМОВОГО МАНЕВРИРОВАНИЯ

Комплекс алгоритмов программы «Aurora» реализует прямые вычислительные эксперименты для испытаний мореходных качеств кораблей и судов в условиях штормового маневрирования произвольными ходами и различными курсами относительно групповых структур трохoidalного волнения. Эксперименты предназначены для изысканий в проектировании обводов и общекорабельной архитектуры корабля повышенной штормовой мореходности, и могут служить тренажером в освоении эффективных режимов штормового хода кораблей и судов флота действующего.

Прямой вычислительный эксперимент строится с различными моделями гидродинамики корпуса, внешнего морского волнения и гидромеханики их взаимодействия. Групповые структуры трохoidalного волнения задаются без ограничений высоты и крутизны штормовых волн, поступательные и вращательные движения цифровой модели корпуса могут иметь произвольный размах, включая ситуации с дельфинированием, брочингом или опрокидыванием корабля. Для этого модели корпуса корабля оцифровываются с палубами и крупными надстройками.

Динамическая модель перемещений и качки корпуса настроена на управляемое движение корабля произвольными ходами и курсами относительно морского волнения. Числовая модель корабля строится в полноразмерных геометрических и динамических масштабах, что позволяет проводить испытания в реальном времени. Для выявления особых режимов штормового хода предусмотрено изменение остойчивости (метацентрической высоты) и осадки корабля, коэффициентов демпфирования корпуса, с возможностью перенастройки трёх групповых структур морского волнения и др.

При выполнении программы «**Aurora.exe**» без параметров делается попытка считывания файла данных **Aurora.vsl** с цифровой моделью корпуса крейсера «Аврора». При отсутствии в рабочей директории этого файла представляется поисковый запрос по маске «\*.vsl», и в случае его отмены по <Esc> в текущей рабочей директории порождается новый файл **Aurora.vsl**, который автоматически считывается и включается в активную работу.

### **Краткое представление математических моделей и алгоритмов**

Главная часть силового гидростатического взаимодействия корабля и морского волнения определяется условно свободным вектором приращения скорости поступательного движения центра масс  $\delta \vec{V}$  [м/с], с изменением интенсивности углового поворота  $\delta \vec{\omega}$  [с<sup>-1</sup>] относительно мгновенного центра величины  $\vec{L}$  [м] из предыдущего шага вычислительного эксперимента во времени.

$$\delta \vec{V} = \mathbf{r} \cdot g \cdot \frac{v\vec{S} - \vec{W}}{|\vec{W}|} \cdot \delta t \quad [м/с]; \quad \delta \vec{\omega} = \mathbf{r} \cdot g \cdot \frac{\vec{L} \times (v\vec{S} - \vec{W})}{\mathbf{M}} \cdot \delta t \quad [с^{-1}],$$

где  $\mathbf{r}$  [δ] – тензор ориентации корабля – главные оси корабельного базиса;  
 $\vec{W}$  [кг] – вектор гравитационной силы тяжести корабля – исходное водоизмещение;  $v\vec{S}$  [кг] – вектор архимедовых сил всплытия по нормали к волновому склону под осреднённой поверхностью действующей ватерлинии – объём погруженных обводов корпуса;  $\vec{L}$  [м] – вектор отстояния мгновенного центра величины от фиксированного центра масс корабля – плечо пары сил;  $\mathbf{M}$  [кг·м<sup>2</sup>] – массовый (объёмный) момент инерции кор-

пуса, зависящий от распределения масс грузов, бортовых механизмов и оборудования, и собственно корпуса.

Массовый момент инерции вычисляется по объему погруженного корпуса, что соответствует равномерному распределению грузов с плотностью воды по всему корпусу. Однако такое допущение нуждается в корректировке по аппликате, так как в отличие от абсциссы и ординаты для центра величины, центр масс корпуса обычно значительно выше центра величины. Таким образом, инерционность по бортовой качке также должна быть несколько большей, что компенсируется увеличением z-компонент тензора на величину квадрата разности от расчетное аппликаты центра величины и предустанавливаемой аппликаты центра тяжести корабля по формулам Гюйгенса-Штернера (*подробнее в третьей главе*).

Основной вектор архимедовых сил всплытия  $\overleftarrow{v}S$  [кг] может вычисляться либо по изменчивому объему погруженной части корпуса, либо интегрированием давления по смоченной поверхности бортовой обшивки. На тихой воде без качки оба метода вычисления погруженного объема дают схожие результаты.

На элементарном треугольнике бортовой обшивки величина и направление силы давления воды вычисляется по площади с вектором нормали в локальной системе отсчета, при этом величина действующего давления приводится к аппликате центра элементарного треугольника  $h_z$  [м]:

$$\overleftarrow{f} = (p_i + \rho \cdot g \cdot h_z) \cdot \overleftarrow{S} \quad [H = \text{кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2]$$

где  $p_i$  – избыточное или наведенное извне давление, например – в случае деформации поверхности воды или под воздействием локальных скоростных потоков;  $h_z$  – аппликата погружения центра площади треугольника;  $\overleftarrow{S}$  – вектор нормали с площадью элементарного треугольника в корабельном базисе;  $\rho = 1025$  [кг/м<sup>3</sup>] – условная плотность морской воды.

Свободный или главный вектор сил<sup>8</sup> гидростатического давления на смоченную обшивку корпуса просуммируется:

$$v\vec{S} = \sum_{\Delta} g \cdot h_z \vec{\delta s} \quad [H/\rho, m^4/c^2]$$

Аппликата точки приложения силы давления воды вычисляется по моменту инерции площади треугольника в проекции его отображения на вертикальной плоскости:

$$h_{\Delta} = h_z + \frac{I_c}{h_z \cdot s_z} \quad [m]$$

где  $s_z$  – проекция площади элементарного треугольника на вертикальную плоскость. В случае горизонтальных площадок поправка  $I_c$  к аппликате  $h_{\Delta}$  обнуляется, а точка приложения сил давления просто сводится к центру площади треугольника  $h_z$ .

$$v\vec{R} = g \cdot \sum_{\Delta} h_z \cdot (\vec{r}_{\Delta} - \vec{G}) \times \vec{\delta s}, \quad [H \cdot m/\rho, m^5/c^2]$$

где:  $\vec{r}_{\Delta}$  – вектор для точки концентрации сил от давления воды на элементарном треугольнике, с учётом поправки на заглубление вертикальной компоненты  $h_{\Delta}$ ,  $G$  - координаты центра масс корабля,  $\delta S$  – вектор нормали с величиной площади элементарного треугольника.

Интеграл по полю давлений может уточняться поправками по скорости течения вблизи элементарных фрагментов смоченной поверхности корпуса, с дополнениями по условиям непротекания [16] (как модели отражения внешнего потока от) судовой обшивки. Нормальные компоненты вектора скорости получаются двойным скалярным произведением с единичной нормалью  $n$  к элементарной площадке (треугольнику) смоченной обшивки:

<sup>8</sup> В уравнениях движения в делителе всегда присутствуют масса или моменты инерции, что формально позволяет опускать множитель:  $\rho$  – плотности воды.

$$\overleftarrow{v}_n = (\overleftarrow{n} \cdot \overleftarrow{v}) \cdot \overleftarrow{n}$$

[м/с]

Асимметрия отражённых импульсов скорости:

$$\overleftarrow{v}_n \times = 1 + (1 - k_v) \cdot n_v,$$

где  $k_v$  – параметр в модели искусственного рассогласования условий не-протекания в зонах турбулентности, отрыва течений или кавитации. По умолчанию установлен коэффициент  $k_v = 0,5$ . Если  $k_v = 1.0$  – величина отрицательного импульса давления не ослабляется, при уменьшении  $k_v \in [0,0 \div 1,0[$  – пропорционально блокируется величина стока соразмерно проекции импульса вектора скорости по нормали к элементарному треугольнику на поверхности смоченной поверхности корпуса, что вблизи ватерлинии подобно оголению обшивки или кавитации.

Скользящий вектор скорости по поверхности судовой обшивки получается аналогичным двойным векторным произведением:

$$\overleftarrow{v}_s = [\overleftarrow{n} \times \overleftarrow{v}] \times \overleftarrow{n} = \overleftarrow{v} - \overleftarrow{v}_n$$

[м/с]

Изменением знака (порядка) в векторном произведении получается вектор  $\overleftarrow{v}_\perp$  для отраженных от элементарной площадки частиц жидкости в направлении нормали  $\overleftarrow{n}$ , который необходим при моделировании отражения волн:

$$\overleftarrow{v}_\perp = (\overleftarrow{n} \cdot \overleftarrow{v}) \cdot \overleftarrow{n} + \overleftarrow{n} \times [\overleftarrow{n} \times \overleftarrow{v}] = \overleftarrow{v}_n - \overleftarrow{v}_s$$

[м/с]

Результирующий вектор силы на элементарном треугольнике:

$$\delta \overleftarrow{f}_\Delta = p_\Delta \cdot \overleftarrow{\delta s} = \rho \cdot \left( \frac{V^2 - |\overleftarrow{n} \times \overleftarrow{v}_s|^2}{2} + \frac{\pm (\overleftarrow{n} \cdot \overleftarrow{v}_n)^2}{2} \right) \cdot \overleftarrow{\delta s},$$

[Н=кг·м/с<sup>2</sup>]

где:  $V$  – скорость хода корабля,  $p_\Delta$  – давление воды на элементе бортовой обшивки. Первый член в выражении определяет изменение давления у

бортовой обшивки за счет касательной составляющей набегающего потока в рамках зависимостей законов Бернулли. Второй член моделирует условие непротекания по аналогии сопоставления давления со скоростью в законе Торричелли, с частичным нарушением компенсирующей симметрии с помощью параметра  $k_v$  при формальном учете турбулентности, отрыва потока и кавитации.

Гидродинамические силы и моменты включаются в алгоритм в качестве дополнений гидростатических интегралов плавучести:

$$\overleftarrow{vS} += \sum \delta \overleftarrow{f} \quad [H, кг \cdot м / сек^2]$$

$$\overleftarrow{vR} += \sum (r_{\Delta} - G) \times \delta \overleftarrow{f} \quad [H \cdot м, кг \cdot м^2 / сек^2]$$

Центр силового сопротивления  $dV$  располагается на линии между действующими в данный момент времени центрами величины и площади ватерлинии:

$$\overleftarrow{dV} = ( \overleftarrow{vF} (iF \cdot dZ) + \overleftarrow{vB} \cdot iV ) / ( iF \cdot dZ + iV ) \quad [м]$$

где:  $vF$  – центр площади ватерлинии;  $iF$  – площадь ватерлинии;  $dZ$  – вертикальное отстояние центра площади ватерлинии от центра величины;  $vB$  – центр величины;  $iV$  – водоизмещение. Все величины, кроме  $dZ$ , измеряются в корабельном базисе.

Динамический центр  $vC$  устанавливается на линии между центрами  $vD$  и  $dV$  с учётом присоединенных масс, включенных параметры демпфирования  $\mu F(\xi, \eta, \zeta)$ :

$$\overrightarrow{vC} = \overleftarrow{dV} \cdot \tanh \mu + \overleftarrow{vD} \cdot (1 - \tanh \mu). \quad [м]$$

Если  $\mu F = 0$  – движение корабля относительно центра масс  $G$ , если  $\mu F \approx 0,55$ , то динамический центр на середине между центрами тяжести  $G$  и присоединенных масс  $vB$ . Движения корабля корректируется поворотом

вокруг центральной оси с угловой скоростью  $\omega$ , проходящей через точку  $vC$ :

$$\vec{Locate} = \mathbf{r} \cdot (V + vC \times \omega) \cdot \delta t, \quad [M]$$

где  $\mathbf{r}$  – тензор локального базиса корабля;  $V$  – текущая скорость хода;  $\omega$  – скорость вращательного движения корпуса.

Корабль, плавающий на свободной гравитационной поверхности, обладает как бы усредненной плотностью морской воды, и захватывается в движение интенсивной кинематикой штормового волнения. Для учёта такого вынужденного движения выполняется простое дополнение результирующей скорости усредненной величиной скоростей течений в потоке воды в объеме водоизмещения.

В алгоритме моделирования движения корабля потоковая скорость в толще волны влияет непосредственно на пространственное смещение корпуса, и только, без наращивания скорости собственного инерционного движения в условно неподвижном пространстве. Тогда, внутрикорпусные ускорения можно вычислять непосредственно по второй производной от приращения координат местоположения корабля, что в полной мере обеспечивает локальные ускорения для моделирования качки и поступательных колебаний корпуса, отчасти соблюдая динамику движения корпуса по волне как по ровной горизонтальной поверхности.

## ***1. Информационная консоль и графические окна визуализации мореходности корабля в штормовом море, интерактивное управление вычислительным экспериментом***

Числовая модель корабля оцифровывается полномасштабными теоретическими чертежами обводов корпуса с частичной обрисовкой главных элементов общекорабельной архитектуры, что позволяет проводить вычислительные эксперименты в реальном масштабе времени, с соблю-

дением инерционных характеристик, пульсаций скорости и периодов качки в наглядном представлении штормовой мореходности настоящего корабля.

Морское волнение моделируется ячеистыми трохoidalными структурами, где фазовые скорости гребней волн вдвое больше их групповых проявлений, то есть, девятые валы существуют на поверхности моря лишь ограниченное время. Характер волнения может перенастраиваться в ходе эксперимента, изначально это три характерные системы волн усиливающегося шторма<sup>9</sup> по курсу корабля на Nord с ходом «вразрез волне»  $15^\circ$  с правого борта:

- интенсивное ветровое волнение ( $\lambda=64$  м,  $h=6,88$  м,  $C=195^\circ$ );
- свежая зыбь действующего шторма ( $\lambda=100$  м,  $h=5,37$  м,  $C=160^\circ$ );
- пологие реликтовые валы от удалённых ураганов  
( $\lambda=160$  м,  $h=3,82$  м,  $C=230^\circ$ ).

Маневры корабля в вычислительном эксперименте выполняются по плавным траекториям циркуляции; плавно происходит набор и потеря скорости хода, что в целом соответствует реальному плаванию со всеми шестью степенями свободы по угловым и поступательным видам качки, с креном на циркуляции и ходовым дифферентом при разгоне и торможении корабля; и что важно – с переменной скоростью хода в зависимости от характера взаимодействия корпуса с конкретными гребнями штормовых волн.

Курс корабля удерживается авторулевым с ограничением скорости циркуляции по трём условным вариантам перекладки руля «помалу», на «полборта» и «на борт» (*угловая скорость изменения курса на циркуляции здесь не зависит от скорости хода*).

---

<sup>9</sup> Сложение девятых валов превышает 16 м – почти невозможная оценка опасности сверху.

Скорость хода регулируется условной «тягой двигателей», с сопротивлением движению с заданной скоростью по «тихой воде», что допускает как потерю штормового хода на интенсивном волнении, так и разгон с дельфинированием на гребнях попутных волн. *При остановленных машинах демпфирование хода применяется по всем компонентам вектора скорости дрейфа, на ходу – только к поперечным компонентам от заданной скорости.*

В ходе эксперимента можно изменять метацентрическую высоту, измеряемую от метacentра тихой воды, соответственно, относительно этого метacentра будет сдвигаться аппликата центра тяжести ( $G_z = m_z - h$ ). Таким образом определяются условия для оценок и анализа характера и интенсивности качки корабля в различных режимах штормового плавания.

Любопытной характеристикой может стать величина метацентрической высоты для возвращения в положение «на ровный киль» опрокинувшегося корабля. Адекватно отработанные обводы и надводная архитектура корабля должны сохранять положительность восстанавливающих моментов в широком диапазоне углов крена, также как и при изменениях осадки корпуса в условиях интенсивной качки. При неблагоприятных проектных разработках опрокидывание на резкой качке происходит при положительной метацентрической высоте, и тогда возврат корпуса на ровный киль теоретически будет возможен при безмерном увеличении метацентрической высоты (смещении аппликаты центра тяжести «ниже килля»).

Осадка и дифферент корабля могут изменяться в предустановках параметров вычислительного эксперимента. В процессе эксперимента возможно интерактивное изменение действующей осадки корпуса, при этом опытовые испытания корабля будут автоматически перенастраиваться и перезапускаться, а в то же время графики с результатами прерываться не будут.

Для быстрого вывода плавающей модели из устойчивого равновесия предусмотрено импульсное изменение крена на  $\pm 30^\circ$  правого или левого борта.

В проведении вычислительного эксперимента задействуются текстовая информационная консоль и два активных графических окна Windows под управлением OpenGL:

### Штормовая мореходность корабля (вычислительный эксперимент)

Ленинград, Кораблестроительный институт  
 \ Санкт-Петербург, Государственный университет  
 Научно-инженерное общество судостроителей им.А.Н.Крылова,  
 подсекция мореходных качеств корабля в штормовых условиях  
 «МИДВ» ©1975-2023 Калининград-Севастополь-Ленинград-Сахалин - Д.И.Иванов - В.Храмушин

>>> Краснознамённый ордена Октябрьской революции крейсер «Аврора»  
 >>{L=123.7,В=16.8,Т=6.4,Ψ=00'\δd=0см}^6.4 № А.103<+147+>113.Ф> Statum{4}

**Волна:** λ=56м, τ= 6", ζ=6/0.89м, С=9.4 м/с, А=191°, δS=4.7м [172·154]={800·720}м  
**Зыбь:** 100м, 8.0", 0.0/0 м, 12.5 м/с, 158°, 6.2м [130·116]  
**Вал:** 156м, 10.0", 0.0/0 м, 15.6 м/с, 236°, 7.8м [104·94]

**P:** { 0.5, 0.0, -2.7 }  
**C:** { 2.6, -0.9, -2.9 } **mC:** | 0.38 -0.92 -0.01 | = -6°  
**Speed** 17.1уз (0.25=0.4L) **W:** { 1.5, -0.5, -1.8 } | 0.91 0.38 0.14 | = 3°  
**Volume** 6817 << 6097 **vW:** { 0.1, 0.0, 1.0 } | -0.13 -0.07 0.99 | = 67°  
**Surface** 2354 << 1876 **mW:** | 19151 5484.1 | **mM:** | 135605 -11079 41635.3 |  
**Floatable** 1436 << 1318 | 5484.1 918267 | | -11079 3570954 -6461.6 |  
**μCenter** 0.8 >> 0.3 >> -0.2 Gravity | 41635.3 -6461 3573807 |  
 h 0.84 >> 1.2 -- μM 156.5 >> 156.3 **inMass:** | 160625 -0.0 33485.8 |  
 | -0.0 4566025 -0.0 |

⊗ Курс ( δ ) заданный => 67.3° <0.2> 67.5° | 33485.8 -0.0 4592476 |  
 крен 8.2°, дифферент 0.7° μV: | ξ0.1ξ0.9 η0.8η0.9 ζ0.6ζ0.9 |  
 Скорость 17.1 из 18.0 узлов ω: | θ0.2θ0.9 ψ0.6ψ0.9 χ0.8χ0.9 |  
 В потоке волн, и/сток: Kv=0.5

C [м] - положение мгновенного центра величины (подводного объёма)  
 mC (δ) - матрица ориентации корпуса (корабельные оси в морском базисе)  
 vF [м] - корабельные координаты центра площади действующей ватерлинии  
 vW (δ) - интегральная нормаль к действию гидростатических сил всплытия  
 vD [м] - условный центр сосредоточения гидродинамических пар сил  
 vS [Н/ρ] - накопительный вектор сил от перепадов уровня моря  
 vR [Н·м/ρ] - поворотный момент от криво-наклонной ватерлинии  
 mW [м4] - моменты инерции площади действующей ватерлинии  
 mM [м5] - объёмные моменты инерции погруженного корпуса  
 inMass - исходные моменты инерции корпуса

«Аврора» <=[кратко]:ход, курс; вертикаль, борт, киль {корма, мидель, нос}

*Рис. 23. Текстовая консоль вычислительного эксперимента имеет размер 92x40 символов. Краткое описание контролируемых параметров приводится в нижней части экрана.*

1 – Текстовая консоль с подзаголовком:

«Штормовая мореходность корабля (вычислительный экспе-

**римент)»** – с текстовой информацией об исходном состоянии корабля, о характеристиках трёх групповых структур морского волнения, о геометрических и динамических параметрах корпуса, ходкости и удержания корабля на курсе.

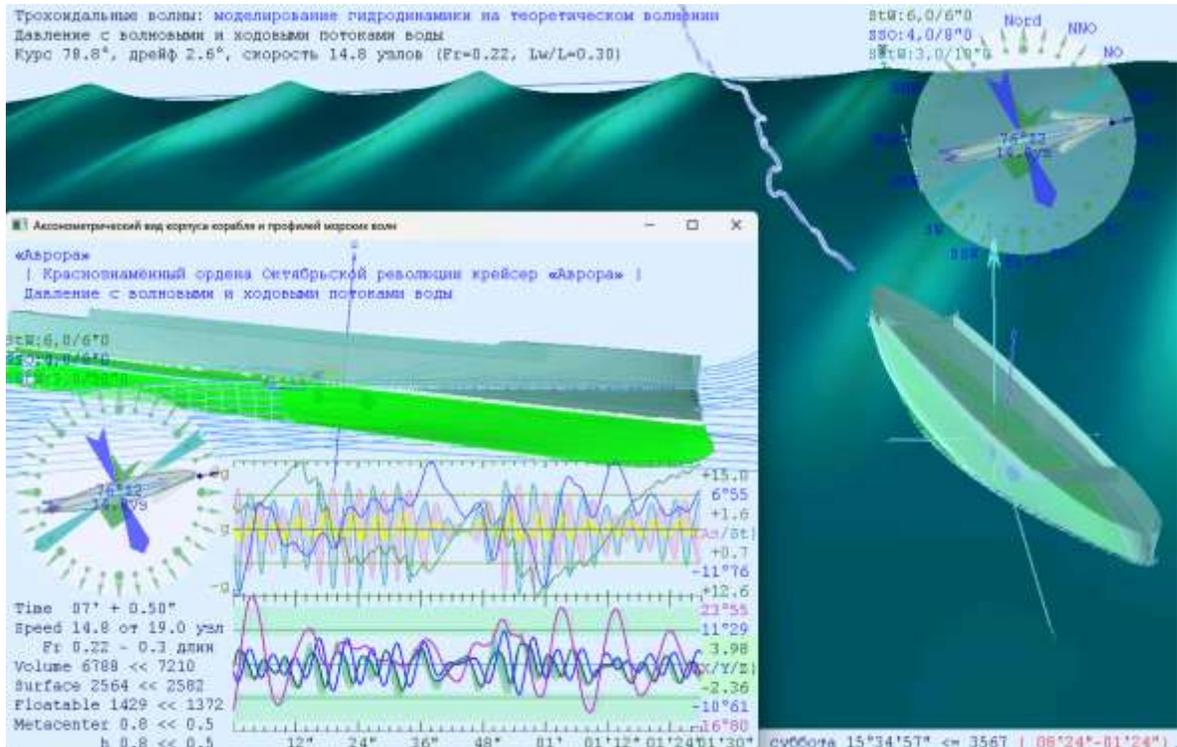
Текстовая информационная консоль открывается в отдельном независимом окне для отображения исходных размерений по корпусу корабля с характеристиками морского волнения. На консоли непрерывно обновляются геометрические и инерционные характеристики корпуса в условиях качки на волнении, приводится информация об углах курса, крена и дифферента, текущая и заданная скорости хода, и другие результаты вычислений по гидромеханике корабля на волнении. В нижней части текстовой страницы приводятся пояснения в форме краткой справки по обозначениям числовых величин.

В самой нижней строке приводится информация о режиме и параметрах ведения текстового протокола, который записывается вслед за параметрами конфигурационного файла *<имя файла модели>\*.vil*.

2 – Графическое окно состояния корабля:

**«Аксонметрический вид корпуса корабля и профилей морских волн»** – с изображением корабля и его гидростатических центров в корпусном пространстве; с контурами морского волнения; графиками бортовой, килевой и вертикальной качки; ходкости, рыскания и вертикальных ускорений на корпусе и в его оконечностях; с картушкой для навигационной и гидрометеорологической информации, включающей параметры морского волнения

Управление вычислительным экспериментом и визуализацией моделируемых процессов выполняются в активных графических окнах: 2) - «корабль»; и 3 - «море» (Рис. 24 и Рис. 25), где имеются краткие контекстные подсказки: **<F1>**, и меню настройки основных параметров: **<F4>**.



**Рис. 24.** Прорисовки динамического состояния корабля в двух графических окнах: в корабельном базисе и в морской системе координат. Показана картушка с текущим курсом и скоростью хода. Стрелками отмечается длина, крутизна и направления движения групповых структур волн. В нижней части графики бортовой, килевой и вертикальной качки, выше ходкость, рыскание и вертикальные ускорения в средней части корпуса и в оконечностях.

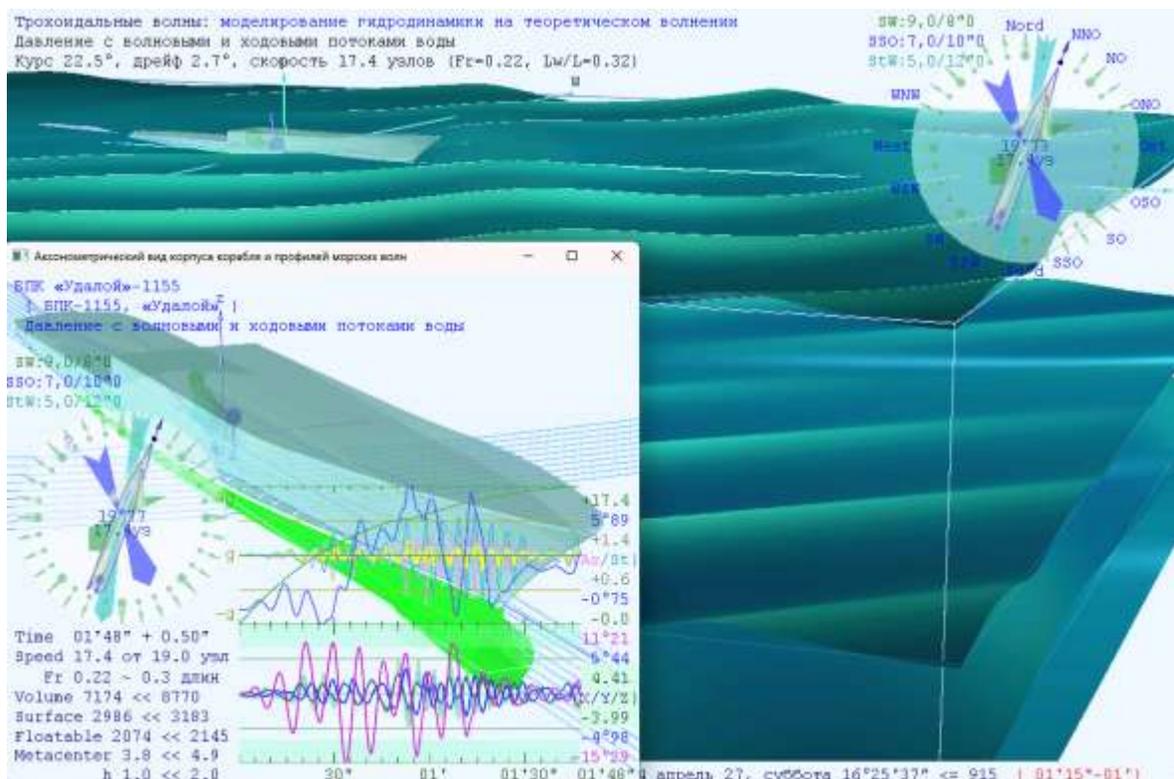
### 3 – Графическое окно вычислительного эксперимента в целом:

#### «Корабль и трохoidalные штормовые структуры морских волн»

– основное графическое окно с изображением корабля в условиях морского волнения. По необходимости, поверхность моря представляется с помощью подвижной сетки, которая может разрезаться до 100 ячеек по каждому направлению.

Волновые структуры могут представляться разделёнными поверхностями, располагающимися ниже основного комбинированного уровня моря, что полезно при раздельном рассмотрении силового воздействия на корабль и отражения волн от корпуса. В нижней строке показывается ко-

личество шагов и время проведения эксперимента, с отметкой запаздывания для реальных отсчётов в случае нехватки вычислительных ресурсов.



*Рис. 25. Изображение всех волновых полей, корабля и маршрута его движения для наглядного представления хода вычислительного эксперимента. В верхних строках записываются действующие режимы моделирования морского волнения и гидромеханики корабля. В нижней строке текущее компьютерное время и количество выполненных циклов. Красные отсчеты минут означают нехватку вычислительных ресурсов, и отставание вычислительного эксперимента от реального времени.*

## **Общий графический интерфейс морского вычислительного эксперимента**

Настройка режимов моделирования и управление вычислительным экспериментом выполняется с помощью компьютерной клавиатуры и графического курсора мыши, действия которых контекстно связаны с активными графическими окнами и охватывают все возможные операции по

визуализации, перестроению гидростатики корпуса, маневрирование изменением хода и курса корабля. Предусматривается также возможность интерактивного перестроения всех трех волновых систем и характера силового взаимодействия корпуса корабля с морским волнением, при этом, по необходимости вычислительный эксперимент может полностью перезапускаться.

Указатель «мыши» может использоваться для настройки графической сцены, поворотов, смещений или приближения изображений корабля и морской акватории. Эти же операции дублируются аккордами стрелок с **<ctrl>** и **<shift>**. Маневрирование ходом и курсом корабля адаптировано к правой цифровой группе клавиш, но может управляться и обычными цифрами с клавиатуры. В обоих графических окнах горячие клавиши быстрого управления экспериментом действуют, как правило, одинаково.

К графическим экранам привязана обработка прерываний\команд от клавиатуры, которые управляют методами раскраски и трехмерной визуализации; включая возможности быстрого возврата к исходным проекциям визуализации, или временной приостановки вычислительного эксперимента:

**<Del** или **Home**> – визуализация возвращается в исходное состояние;

**<BkSp**> – происходит временное исключение моделирования морского волнения, а при последующем восстановлении волнового поля может выполняться полный перезапуск всего вычислительного эксперимента;

**<Tab**> и **<Пробел**> – методы раскраски в контексте графических окон;

**<Стрелки**> и **<мышка слева**> – поворот сцены относительно видимой горизонтальной (вверх-вниз) или вертикальной (вправо-влево) оси на экране;

<**Shift+Стрелки**> и <**мышка справа**> – поступательное перемещение графической сцены в направлении курсора-указателя;

<**Ctrl+Стрелки вверх-вниз**> и <**колёсико мышки**> – приближение / отдаление сцены, изменение видимого масштаба;

<**Ctrl+Стрелки вправо-влево**> – модель на экране наклоняется относительно собственной поперечной оси (z), вращение по ориентации взгляда на графическую сцену.

<**Escap**> – запрос на завершение вычислительного эксперимента с корректным закрытием протоколов и остановкой программы «Аuroга».

При вызове подсказки <**F1**> или контекстного меню <**F4**>, вычислительный эксперимент не должен останавливаться. Если это случается, то лучше закрыть и снова открыть текстовое окошко, так как иначе прерванные вычисления затем с явной перегрузкой будут достигать упущенное «реальное время» эксперимента.

### *Гидромеханика корабля: выбор и включение в эксперимент математических и алгоритмических моделей*

Выбор и установка модели гидромеханики корабля осуществляется либо в строке внут-

#### **Выбор модели гидромеханики корабля**

Кинематика качки на 4-х точках по склонам волн  
Объёмная плавучесть переменного водоизмещения  
Давление смоченных элементов бортовой обшивки  
Давление на встречном потоке с качкой корабля  
Давление с волновыми и ходовыми потоками воды

ри стандартного меню настроек <**F4**>, либо по команде <**F8**> из любого графического окна.

В подборке вычислительных моделей внутри вложенного меню <**F8**> – «**Выбор модели гидромеханики корабля**», предлагается к использованию пять взаимодополняющихся вычислительных моделей пространственной динамики и гидромеханики корабля, каждая из которых

может целевым образом применяться как в проектных изысканиях, так и в интересах достижения практической эффективности и безопасности плавания корабля в штормовых условиях.

1 – «Кинематика качки на 4-х точках по склонам волн»: динамическое скольжение с использованием быстрых градиентов волнового склона по пятиточечному шаблону из четырех смежных треугольников, с корректным учетом инерционных характеристик корабля в движении на склонах волн;

2 – «Объёмная плавучесть переменного водоизмещения»: вычисление объёмных интегралов с уточнением силового действия по интегральному градиенту относительно поверхности действующей ватерлинии;

3 – «Давление смоченных элементов бортовой обшивки»: интегрируются давления на элементарных треугольниках смоченной бортовой обшивки;

4 – «Давление на встречном потоке с качкой корабля»: в расчёты включаются встречные потоки воды, распределённые по смоченной поверхности бортовой обшивки, что моделирует обтекания корпуса на ходу корабля;

5 – «Давление с волновыми и ходовыми потоками воды»: вычислительный эксперимент дополняется скоростями течений в толще воды под волновыми гребнями.

За исключением первой условно кинематической модели, в вычислительном эксперименте задействуются все шесть компонент внешних поступательных и вращательных воздействий со стороны штормовых волн, с гидромеханическим инерционным откликом в свободном пространственном движении корабля относительно некоего условного центра силовой реакции корпуса (как бы «центра бокового сопротивления»).

Рабочим режимом в комплексе «Аурога» предустанавливается последний, приведённый в нижней пятой строке, №5, где в алгоритмиче-

ском синтезе включаются все внешние гидростатические и гидродинамические возмущающие силовые воздействия.

Формально второй режим, №2, наиболее корректно соответствует Архимедовым законам плавания твёрдого тела по законам замещаемого объёма для погружаемого в воду корпуса корабля. Для тихой воды объёмный интеграл в точности совпадает с интегрированием давлений вода по поверхности судовой обшивки. На волне можно применять ассиметричную поправку по уровням воды на противоположных бортах корабля. В условиях интенсивного морского волнения для объёмного интеграла возникают неопределённости по форме поверхности действующей ватерлинии, и потому, всё же в качестве основного выбирается вариант интегрирования давлений по смоченной поверхности корабельных обводов.

Две оставшиеся модели гидромеханики (№3 и №4) – облегчённые, в одной не учитываются никакие скорости течений вблизи корпуса, у другой в расчет принимается только поступательный встречный скоростной поток воды. Такие модели гидродинамики корабля могут быть полезны в отладке вычислительных экспериментов, или в проектной отработке конкретных гидродинамических эффектов, с выявлением каких-либо геометрических и гидродинамических особенностей в корабельных обводах.

### *Интерактивное управление ходом и курсом корабля*

На картушке справа–вверху курс корабля указывается *светло-синей* прорисовкой конструктивной ватерлинии, с *синим* обрамлением изменчивого контура ватерлинии действующей. *Жёлтая* стрелка со светлым контуром показывает заданный курс, дополняемый по картушке буквами румбов.

При маневрировании или рыскании корабля заданный и действующий курсы рассогласуются. Для приведения на курс используется услов-

но автоматическое управление «рулем», при котором в движение корабля привносится дополнительная скорость циркуляции, величина которой характеризуется по аналогии естественным командам на руль как: «по малу», «руль полборта» (7-влево, 9-вправо = 120 сек на полный круг циркуляции) или «руль на борт» (4-влево 6-вправо = 60 сек), что отмечается изображением пера руля на отображении корпуса внутри картушки.

Поддержание курса выполняется «авторулевым», и в случае отклонения на один румб руль автоматически переключается в режим «по малу» (240 сек), что придаёт кораблю циркуляцию вдвое меньшую, чем «руль полборта». В спокойном свободном плавании модель обладает слабой устойчивостью на заданном курсе, обеспечиваемой шестикратно меньшей скоростью поворота (24 мин), чем в автоматическом приведении на курс с переключкой руля «по малу».

По мере набора хода за форштевнем прорисовывается расходящийся светло-голубой с зеленым контуром треугольник Кельвина, сторона которого соответствует видимой длине корабельной волны для заданной скорости хода. При реверсе хода этот волновой клин будет расходиться от ахтерштевня.

Три перекрещивающиеся стрелки на картушке характеризуют моделируемое в эксперименте морское волнение. Длины стрелок соответствуют длине волны, а утолщение характеризует высоту и крутизну гребней девятых валов. Характеристики волн и цвета стрелок могут переименовываться, исходно это: *зеленая* – ветровая волна; *голубая* – свежая ветровая зыбь; *синяя* – пологий накат океанских валов – реликтовых волн от дальних штормов.

В центре картушки приводятся действующие на данный момент времени курс и скорость хода корабля.

Текстовыми надписями на графических экранах слева вверху показываются режимы проведения вычислительного эксперимента: полная

гидромеханика; градиенты архимедовых сил; вертикальная гидростатика; и скольжение по хордам четырех точек на поверхности волн.

Слева внизу приводятся время проведения эксперимента, заданная и действующая скорости хода, в том числе по Фрудру ( $Fr$ ) и в длинах корабельных волн ( $Lw/L$ ); а также основные гидростатические и метацентрические характеристики корпуса корабля, предварительно замеряемые по тихой воде и на текущий момент времени.

Управление ходом корабля выполняется с использованием правого дополнительного блока клавиатуры, и также могут применяться цифровые клавиши:

<7> – поворот на один румб влево; <9> – вправо, руль полборта;

<4> – выход на один румб влево; <6> – вправо, руль на борт;

<5> – «так держать» – устанавливается действующий курс корабля;

<Alt> – изменение курса временно останавливается (одерживает);

<8> – ход быстрее два узла вперед; <2> – два узла тише ход и назад;

<0> – полная остановка машины, ход спадает до выхода в дрейф;

<1> – добавляется крен  $30^\circ$  левый борт; <3> – плюс  $30^\circ$  правый борт;

<Ctrl> – временная приостановка вычислительного эксперимента;

<Ctrl+Shift> – остановка вычислений в ожидании повторного

<Ctrl>.

Сдерживание циркуляции клавишей <Alt> может быть полезно во избежание сильного (аварийного) накренения корабля, выполняющего поворот на большой скорости хода.

Временная приостановка вычислительного эксперимента с необходимым смещением часов реального времени выполняется при удержании нажатой клавиши <Ctrl>. При дополнении аккорда до <Ctrl>+<Shift> пауза в проведении вычислительного эксперимента будет зафиксирована на ожидание следующей команды с нажатием и отпуском <Ctrl> (обнаружилось, что Windows не связывает эти ко-

манды с активностью конкретных окон, позже это исправится, а пока желательно быть внимательным к **<Ctrl>** и **<Shift>** во время проведения вычислительных экспериментов).

## Сохранение цифровых моделей корабля в инородных форматах

В программном комплексе «**Aurora**» не предусматривается возможностей по редактированию цифровых моделей корпуса корабля. Отчасти такие операции допустимы в системе управления базой данных «**Vessel**», в модуле «**Hull**». Предусмотрена специальная процедура для экспорта 3D-модели корпуса корабля во внешний файл в одном из обменных текстовых вариантов программы «DesignCAD».[dc2,dc3], или в популярном формате «WaveFront's».obj.

**<F2>** – команда функциональной клавиатуры может быть подана с любого из графических экранов, по которой вызывается специальное меню с заголовком:

«Выходной формат модели корпуса корабля».

Корабельной

| <b>Выходной формат модели корпуса корабля</b>      |             |
|----------------------------------------------------|-------------|
| Free!Ship exchange format (треугольники)           | .fef        |
| Wavefront Technologies Advanced Visualizer         | .obj        |
| <b>Шпангоуты и контуры диаметральной плоскости</b> | <b>.dc2</b> |
| Контурная модель в трёхмерной проекции             | .dc3        |
| Корабль с контурами и обшивкой корпуса             | .dc3        |

программой Free!Ship<sup>10</sup> предусматривается экспорт данных по форме корпуса в принятый здесь формат [Hull].vsl. По первой строке вышеуказанного меню выполняется экспорт корпуса в обменный формат [Ship].fef, пригодный для считывания во Free!Ship. На запись здесь подаются только треугольники, стандартно структурированные по индексам третьего блока выходных данных. Рёбра второго блока данных пропускаются, отчего в совсем старых версиях Free!Ship может возникать ошибка.

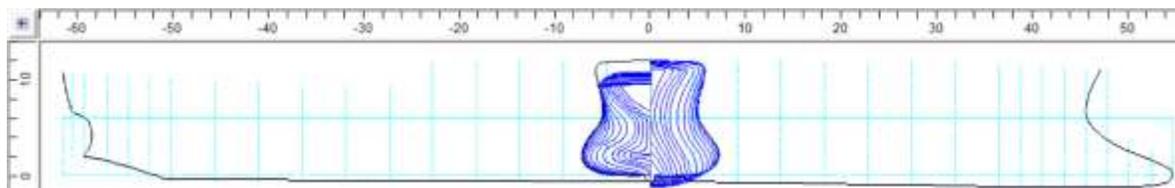
<sup>10</sup> [ShipDesign.ru/SoftWare/Aurora.z](http://ShipDesign.ru/SoftWare/Aurora.z)

Простейшую геометрическую модель корабля в виде связной поверхности из множества разрозненных треугольников можно записывать в популярном формате графической визуализации: «Wavefront Technologies for Advanced Visualizer».obj.

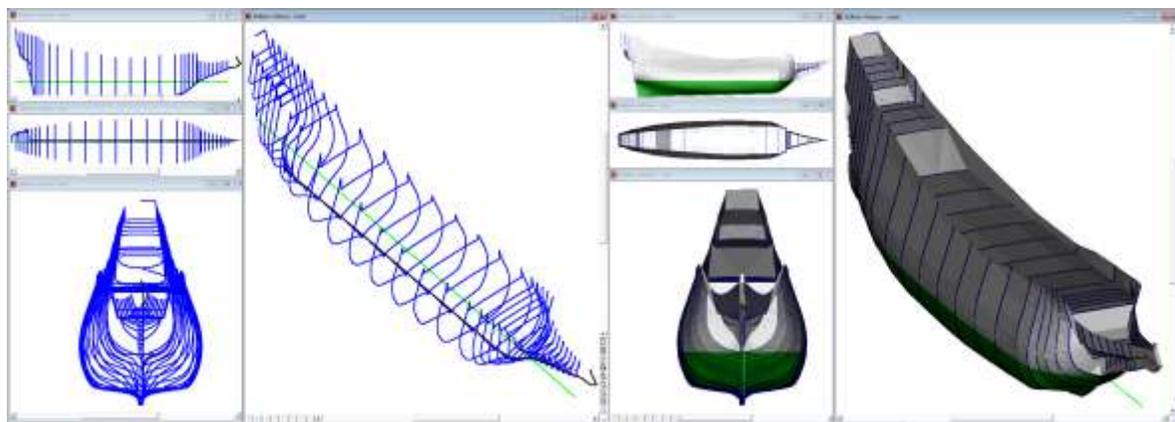
**Aurora.mtl**

```
newmtl gray
Kd 0.6 0.6 0.6
newmtl green
Kd 0 0.5 0
```

При создании такого графического файла используется два предустановленных цвета. Подводная часть корпуса отмечается зеленым, надводная – шаровой расцветкой, что отмечается названиями цветов в файле «Aurora.mtl».



**Рис. 26.** Вариант экспорта модели корабля для работы в DesignCAD-express (\*.dc2) в традиционном двумерном или «бумажном» представлении теоретических чертежей. Здесь совмещаются проекции бок и корпус, с разметкой аппликат относительно основной линии.



**Рис. 27.** Корабль «Васа», экспортированный в трёхмерный проект корпуса для работы с программой DesignCAD (\*.dc3). Аппликаты приведены к ватерлинии. Слева четыре проекции контурной модели корабля, справа – с треугольниками бортовой обшивки, в том виде, как они задействуются в вычислительном эксперименте.

Практические настройки расцветки выполняются в этом текстовом файле под названиями: **gray** и **green**, там же можно подстроить про-

зрачность или особую освещенность цифровой модели корпуса, или пере- назначить реальную расцветку модели корабля.

Для последующей правки цифровой модели (Рис. 26, Рис. 27) можно воспользоваться одним из трёх вариантов формирования модели корабля в типовой среде графического редактирования программы **DesignCAD**, для которой ранее свободно публиковались обменные форматы файлов и графических примитивов в текстовом представлении.

При воссоздании цифровой модели корабля в привычном формате двумерного чертежа не отбрасываются компоненты для пространственно- го представления корпуса. Выполняется также предметное связывание в блоки элементов корпуса корабля, и тематическое разделение графиче- ских объектов по нумерованным и именованным слоям:

0 – <имя файла цифровой модели корабля>.dc2

1 – Grid – светло-голубая разметка сетки шпангоутов, основной ли- нии и ватерлинии в проекции бок (Рис. 26), с пространственная разметка габаритов корпуса;

2 – Frames – две группы шпангоутов, в варианте двумерного пред- ставления теоретического чертежа в проекции «корпус». Средствами группировки графических примитивов в формате <DesignCAD- express>.dc2, шпангоуты разделяются на носовые и кормовые ветви отно- сительно мидельшпангоута;

3 – Stern and Stem line – контуры корпуса на пересечении с диаметральной плоскостью в проекции бок теоретического чертежа, раз- деляются на описания по форштевню и ахтерштевню, с записью в после- довательности по возрастанию аппликат точек на штевнях;

4 – Aft and Bow breadth – поперечная проекция по тем же кон- турам штевней на диаметральной плоскости, но с ординатами транцевых или бульбовых расширений по тем же отсчетам аппликат, которые тре- буются для уточнения потерянных объемов и чувствительных моментов

инерции в бульбовых расширениях и транцевых сломах в оконечностях корпуса.

В трёхмерном представлении <DesignCAD>.dc3, начиная со второго слоя разделение графических объектов выполняется иначе:

0 – <имя файла цифровой модели корабля>.dc3

1 – Grid – разметка шпангоутов (Рис. 27-слева) и пространственная разметка габаритов корпуса;

2 – Portside – по левому борту записываются все шпангоуты с общей величиной абсциссы, все добавляемые и отклонённые штевнями точки исключаются.

3 – Starboard side – шпангоутные контуры правого борта заносятся в таблицу ординат вместе с абсциссами смежных точек, копируемых со штевней;

4 – Stern and Stem line – контуры штевней, возможно с горизонталями днища и палуб из проекции «бок» теоретического чертежа.

5 – Hull plating – треугольники обшивки формируются строго по тем же алгоритмам (Рис. 27-справа), что и в процессе проведения вычислительного эксперимента.

Дополнительно при формировании файла числовой модели выполняется группировка связанных графических объектов, как правило блоками по слоям: «сетка и разметка»; «диаметральная плоскость», «правый» и «левый» борта, и другие по необходимости.

Из графического редактора DesignCAD возможен экспорт цифровых теоретических чертежей в иные популярные цифровые форматы, типа «Initial Graphics Exchange Specification».iges, или «AutoCAD».dwg, и другие...

## 2. «Аксонетрический вид корабля и профилей морских волн»

Подводная часть корпуса зеленая, надводная – шаровая, смоченная поверхность немного затемнена. Белой полосой размечена конструктивная ватерлиния, изменчивая действующая – синими линиями–стрелками, окаймляющими поверхность воды внутри шпаций. К действующей ватерлинии примыкают стрелки ортов нормалей к поверхности судовой обшивки. (Рис. 29) От геометрического центра корабля на конструктивной ватерлинии и мидельшпангоуте, как от начала корабельной системы координат начинается разметка цепочки точек маршрута по ходу корабля на каждый расчётный момент времени.

**<F2>** «запись модели в CAD-формате» – здесь вызывает меню с выбором вариантов для экспорта цифровой модели корпуса корабля в один из типовых графических форматов (Рис. 26, Рис. 27): Free!Ship.fef, Wave-Front.obj и DesignCAD.dc2/3, последний в виде листа теоретических чертежей; трёхмерной контурной модели и модели с обшивкой.

**<F3>** «выбор и чтение иноного корпуса» – здесь выполняется запрос нового имени файла цифровой модели корабля, и происходит считывание иноного корпуса в стан-

**Ship** Целевое проектирование, теория и штормовая мореходность корабля.

F1 – краткая справка  
F2 запись модели в CAD-формате  
F3 выбор и чтение иноного корпуса  
F4 настройка гидромеханики хода  
F5 изображение обшивки и потока  
F8 гидромеханика штормования

§ «Управление ходом корабля»  
<8/2> ± два узла вперед/обратно  
<7/9> ± румб влево/право полборта  
<4/6> ± румб влево/вправо на борт  
<1/3> ± крен 30° на левый/правый  
<5/Alt> руль прямо/так держать  
<0> стоп машина

§ «Настройки моделирования»  
<Enter> отрисовка графиков  
<Tab/Space> закраски/контур  
<Ctrl+Shift> задержка или стоп  
<стрелки•leftMouse> ориентация  
<+Shift•rightMouse> смещение  
<+Ctrl•(roll)> дальность, наклон  
<<Del>+<Shift> исходный обзор  
<BkSp> прекращение волнения

дартном формате <имя>.vsl, при этом заменённый корпус оказывается под действием ранее инициированного волнового поля.

<F4> «настройка гидромеханики хода» обращается к меню «Гидростатика и динамика корпуса» – основные запросы по настройке методов визуализации с выбором моделей гидромеханики и интерактивного изменения гидростатических и динамических параметров модели корабля в вычислительном эксперименте.

В первой строке приводится ссылка на вложенное меню с режимами гидромеханики силового

### Гидростатика и динамика корпуса

Давление с волновыми и ходовыми потоками воды  
Начальная метацентрическая высота:  $h = +0.85$  м  
Факторы демпфирования:  $x = 0.10$   $y = 0.80$   $z = 0.60$   
бортовая: 0.20 килевая: 0.60 рыскание: 0.80  
Доля сток/исток в модели непротекания:  $kV = 0.50$   
Вовлечение в кинематику волн. Осадка: 6.40 м  
«Изображение корпуса» Длина графиков 0.50 мин

взаимодействия корабля с морским волнением, та же, что и в синхронно работающем окне для вычислительного эксперимента на трогоидальном волнении. Вне меню режимы проведения вычислительного эксперимента переключаются на функциональной клавиатуре по команде <F8>, что упоминалось выше в разделе «Гидромеханика корабля: выбор и включение...».

Во второй строке метацентрическая высота  $h$  [м], может изменяться

### Выбор модели гидромеханики корабля

Кинематика пяти точек шаблона на склонах волн  
Объёмная плавучесть переменного водоизмещения  
Давление смоченных элементов бортовой обшивки  
Давление на встречном потоке без морских волн  
Давление с волновыми и ходовыми потоками воды

динамически в любое время, в том числе непосредственно в процессе вычислительного эксперимента, что может потребоваться, например, для повторной постановки на ровный киль опрокинувшегося корпуса корабля. Метацентрической высота связана с изменяющейся аппликатой центра тяжести как:  $h = Z_m - Z_g$  относительно предварительно вычисленной геометрической характеристики – аппликаты поперечного метацентра.

В третьей и четвёртой строках коэффициенты демпфирования для поступательных {  $\xi$ -продольная,  $\eta$ -поперечная,  $\zeta$ -вертикальная } и угловых скоростей {  $\vartheta$ -бортовая,  $\varphi$ -килевая,  $\chi$ -рыскание } качки { 0 – без демпфирования; больше нуля – стандартные факторы торможения скоростей качки; меньше нуля – неограниченное раскачивание или самовозбуждаемое отклонение корпуса от сбалансированного состояния }. Формально, положительные факторы учитывают влияние вязкости на мгновенные скорости отклонения от нейтрального положения корпуса, а также инерционные поправки для присоединенных массы жидкости при ускоренных движениях корабля.

В пятой строке «Доля сток/исток в модели непротекания:  $kV = 0.50$ » приводится коэффициент уменьшения отрицательного компонента скорости – стока, относительно встречной скорости – источника в модели непротекания корпуса окружающем скоростном потоке жидкости. Если  $kV = 1,0$ , то полной мере исполняется парадокс Д'Аламбера об отсутствии суммарных динамических реакций в идеальной жидкости. При  $kV \in [0 \div 1 [$  меньше единицы – моделируется нечто подобное вязкостному сопротивлению, формально похожему на частичный отрыв вихревого слоя в зоне разрежения в кормовой оконечности.

В шестой строке включается модель кинематического захвата корпуса волновым потоком «Вовлечение в кинематику волн», с сильной стратификацией скоростей под гребнями трохоидальных волн. Корпус корабля оказывается под воздействием сильных поперечных ускорений внутри волновых потоков, где величина метацентрической высоты отчасти служит компенсации бортовую качки под силовым воздействием давлений на бортовую обшивку. Иначе, в режиме «Свободная динамика на волнах» кинематика корпуса свободна от кинематического увлечения в движение внутри волновых потоков, что несколько усилит силовые импульсы при отражении волновых воздействий.

В этой же строке изменяется «*Практическая осадка*», отмеряема относительно основной линии. Цифровая модель корпуса заново считывается из файла, после чего автоматически перевычисляются все инерционные, гидростатические и геометрические характеристики корпуса, с приведением поперечной метацентрической высоты  $h$  к её изначальной величине. Построение кинематических графиков с результатами вычислительного эксперимента продолжается с текущими настройками в тех же временных отсчётах.

В левой части нижней строки стоит вызов подменю: «*Варианты изображения корпуса + потоки*».

По верхней строке подменю последовательно перебираются четыре варианта закраски корпуса с режимами прозрачности для проявления действующей ватерлинии и пространственного местоположения гидростатических центров.

#### **Варианты изображения корпуса + потоки**

Обшивка корабельного корпуса и надводный борт  
Скорости течений по смоченной обшивке скрыты  
Закрашиваемая поверхность корабельной обшивки

Эта же выборка может исполняться вне меню по команде <Таб> с клавиатуры:

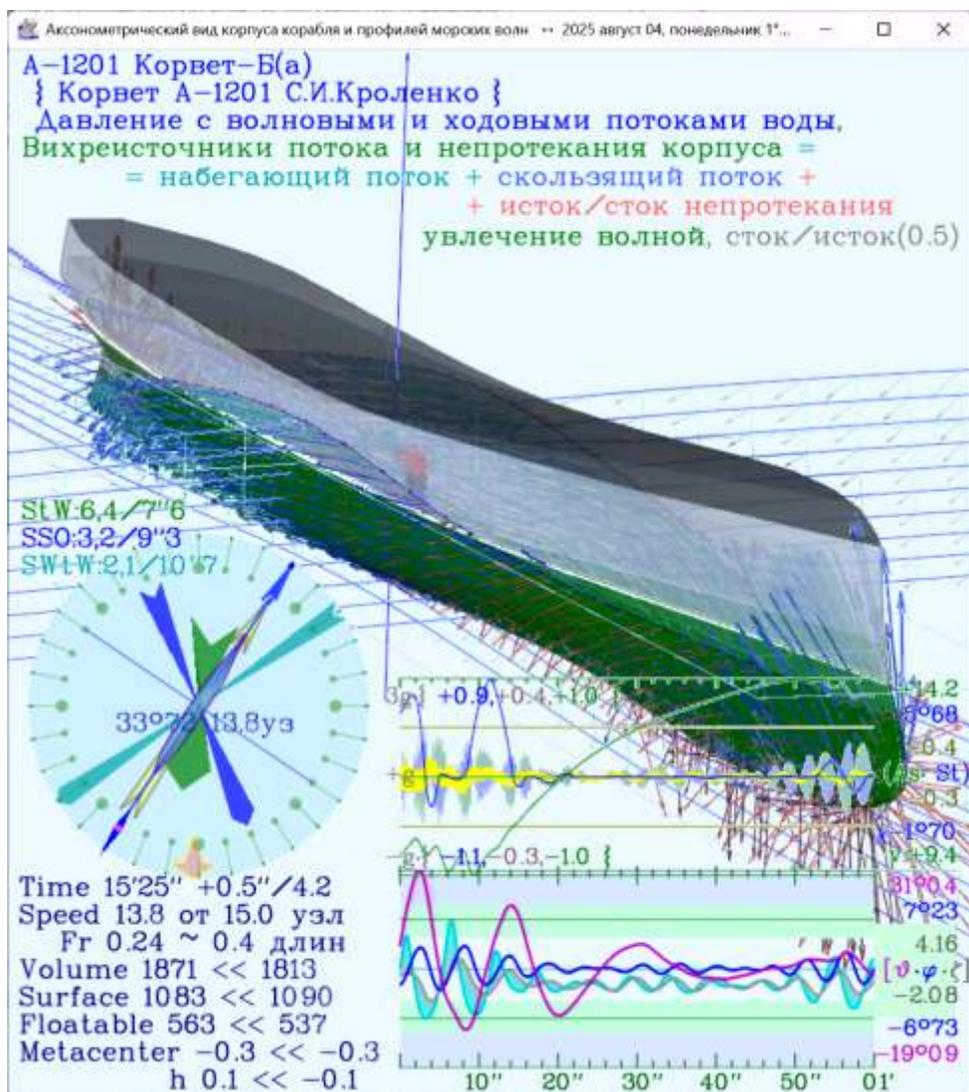
«*Обшивка корабельного корпуса и надводный борт*» - обычная раскраска рабочей модели корпуса корабля;

«*Смоченная обшивка под поверхностью ватерлинии*» - с прорисовкой только шпангоутов открывается надводный борт;

«*Контуры шпангоутов при поверхности ватерлинии*» - относительно непрозрачной остаётся только поверхность действующей ватерлинии;

«*Полупрозрачная тень, гидростатические отметки*» - корпус становится прозрачным и еле-еле видимым, открываются для контроля все статические и быстро перемещающиеся гидростатические центры.

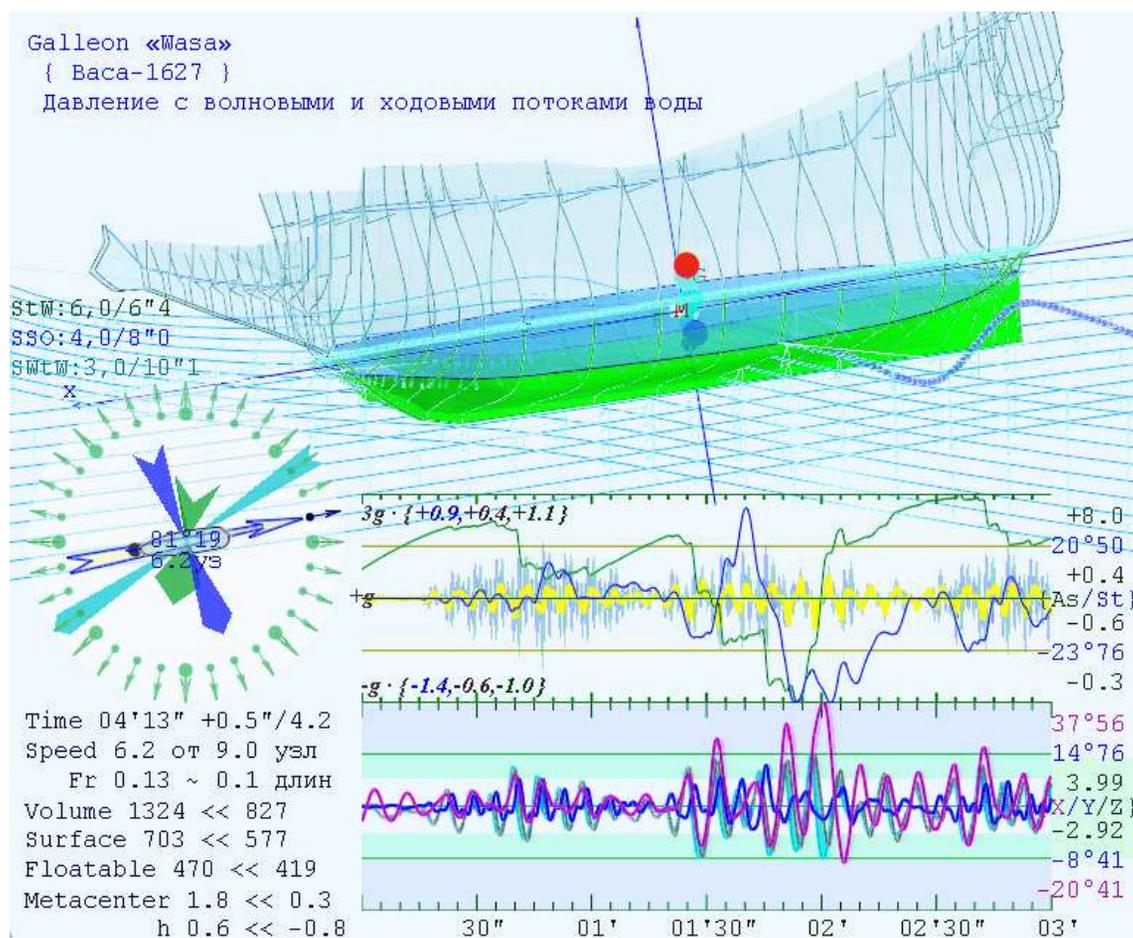
По средней строке: «Скорости течений по смоченной обшивке скрыты» – выбираются варианты отображения скоростей течений вблизи судовой обшивки.



**Рис. 28.** Поток по смоченной обшивке. Прорисовка голубыми стрелками набегающих и волновых потоков вблизи корпуса; с разложением синими стрелками по скользящим течениям для модели вихревого слоя по смоченной обшивке; с распределением источников/стоков для модели непротекания корпуса. Масштаб стрелок показывает ежесекундные смещения частиц воды относительно геометрических размерений корпуса корабля.

В первых двух случаях светло-голубым отображаются стрелки набегающего ходового потока совместно с мгновенно действующими скоростями в толще трохоидального штормового волнения.

Синими стрелками «Касательные компоненты обтекающих скоростей», которые дополняются нормальными компонентами красного цвета для формирования распределенных особенностей: «Вихреисточники потока и непротекания корпуса». В третьем режиме: «Импульсы скоростей излучения и отражения волн» – фиолетовыми стрелками показываются скорости для отражаемых корпусом потоков, создающих корабельное волнообразование; и отражение падающих на корабль штормовых волн. Вне меню последовательный выбор для отображения стрелок течений осуществляется по команде <Shift+пробел>.



**Рис. 29.** *Ход вычислительного эксперимента в окне для представления гидромеханики корабля. Вертикальная качка превышает 7 метров. Сильное рыскание и дрейф по курсу возникает в моменты экстремальной бортовой качки. Внизу графики бортовой X, килевой Y и вертикальной Z качки с масштабной шкалой справа. На левой шкале верхних графиков масштаб для кривых вертикальных ускорений.*

В нижней строке переключается метод прорисовки судовых поверхностей с закраской, либо с помощью рёбер треугольников (Рис. 29):

«*Закрашиваемая поверхность корабельной обшивки*» и  
«*Контуры рёбер триангуляционного покрытия*».

В правой части нижней строки нижней: «*Протяжённость кинематической выборки 0,5 мин*» - устанавливается длительность скользящего интервала времени для визуализации графиков бортовой, килевой [°], вертикальной качки [м], ускорений на миделе и в оконечностях [м/с<sup>2</sup>], ходкости [узлы], рыскания [°] и другие.

Выбор отображения одной или двух полос для графической регистрации в заданном интервале времени некоторых динамических параметров состояния корабля выполняется по команде <Enter> с клавиатуры.

В табличке слева-внизу (Рис. 29) приводятся навигационные параметры по ходу парусного галеона «Wasa»: текущее время и расчётный шаг вычислительного эксперимента; заданная скорость хода – 9 узлов и мгновенная величина достигнутой ходкости на крупной волне только 6,2 узла; другие исходные и текущие геометрические, инерционные и метacentрические характеристики корпуса на ходу на волнении.

Правее в нижней части графического окна, в прямоугольном поле с разметкой по скользящему интервалу времени, строятся кинематические графики состояния моря и корабля. Отсчёт времени для графиков в минутах и секундах размечается по нижней шкале.

В варианте двух полей для регистрации параметров хода вычислительного эксперимента, переключаемых по команде <Enter>, в нижнем поле представляются четыре графика: фиолетовым – бортовая качка ( X ); синим – килевая качка ( Y ); и закрашенная полоса с серым контуром для вертикальной качки, плавно переходящая в голубой цвет с расширением полосы до уровня моря в точке миделя по корпусу корабля на тот же момент времени. Для вертикальной качки экстремумы сводятся строго к поло-

вине вертикального масштаба нижнего поля, при этом уровень моря вблизи корабля может зашкаливать за горизонталь указываемых ограничений.

По правой стороне графических полей в едином масштабе приводится шкала экстремумов для бортовой и килевой качки: фиолетовым – бортовая ( $X$ ); синим – килевая ( $Y$ ) качка в угловых градусах. В середине шкалы цветом отмечаются метки измеряемых величин, и ближайшие значения по ( $Z$ ) – максимальные отклонения корпуса от уровня спокойного моря в темпе вертикальной качки в метрах.

Во второй верхней полосе тонкими линиями изображаются: **зелёным цветом - текущая скорость хода** в узлах в глобальной морской системе координат, **и синим – рыскание на курсе**, как отклонение от заданного курса в °градусах. Здесь же, симметрично от центральной горизонтали закрашиваются пульсирующие всплески ускорений в оконечностях (Рис. 29), **синим – по корме; зелёным – по носу**, в масштабе относительно отклонений от ускорения свободного падения. Толстой желтой линией поверху накладывается кривая ускорений в средней части корпуса. На левой шкале приводятся отметки фиксированного масштаба от  $-g$  до  $+3 \cdot g$  для замеров вертикальных ускорений на палубе корабля, и правее текущие экстремумы в видимой части графиков для частей корпуса: в **корме – синей, на миделе - коричневой** (вместо жёлтой) и **по носу – зелёной** расцветкой экстремальных числовых значений.

На правой шкале здесь также приводятся экстремальные значения на видимом интервале времени, с левой стороны картушка с наглядным представлением направления движения корабля относительно штормового волнения с отмеченной крутизной волновых склонов.

Если вертикальные ускорения отмечаются отрицательными значениями, то незакреплённый (без найтовов) груз на палубах корабля, оказавшись в невесомости, отрывается от палубы с угрозой разрушения корпусных конструкций.

При повторении команды **<Enter>** с клавиатуры, верхнее поле с кривыми ходкости и рыскания исключаются, а графики ускорений переносятся поверх изображения бортовой, килевой и вертикальной качки.

Можно обратить внимание, что эпизодически происходит сильная раскачка корабля под воздействием крутых гребней в средней части групповых структур трохoidalного волнения, и особо при встрече с девяти-ми валами. Как правило, такая интенсивная раскачка случается одновременно по всем регистрируемым параметрам.

Старинный корабль «Васа» вполне уверенно держится на опасном курсе лагом к волне шестиметровой высоты.

На картушке слева, под княвдигедом корабля, показана перекладка руля помалу влево на восстановление заданного курса, это работа авторулевого в случае рыскания на курсе с отклонением более 1 румба ( $11^{\circ}15'$ ). Тонкая жёлтая стрелка с синим окаймлением указывает заданный курс. Над картушкой приводятся параметры трёх групповых структур морского волнения: направление распространения в румбах; высота волны в метрах и период волны в секундах. Три стрелки на картушке показывают направление и длина активированных волн в сопоставлении с длиной корабля, утолщение стрелок в точности характеризует крутизну волны (как отношение высоты к длине).

### *Гидростатические и метацентрические воззрения в динамике корабля*

Для информационной полноценности прямого вычислительного эксперимента, в специальном графическом окне приводится комплекс данных по текущей динамике и гидромеханике корабля в текстовом и графическом представлениях. Дополнительно показываются сведения о навигационном и гидрометеорологическом окружении на море, что в целом вос-

требуется в практике проектных изысканий для всепогодного корабля, а также в навигационных проработках штормового маневрирования, для выбора эффективного хода и курса корабля при наилучшем исполнении морских операций по предназначению.

Чисто академический интерес определяется необходимостью сверки традиционных метацентрических воззрений на остойчивость и безопасность штормового плавания корабля, теоретическая ориентация на которые весьма затруднительна в эмпирических прогнозах интенсивной качки, что ограничивается математически ввиду больших поступательных и вращательных смещений корпуса корабля под ударами волн на интенсивном трохoidalном волнении. Тем не менее, мгновенные оценки внешних сил и реакций корпуса, в том числе с использованием ключевых положений метацентрического анализа, по результатам прямых вычислительных экспериментов могут быть улучшены и синтезированы для новых адекватных оценок опасности экстремальной качки и опрокидывания корабля.

Для наглядного представления метацентрической динамики корабля, для углублённого понимания привычных наставлений из теории корабля, внутри полупрозрачного корпуса всегда изображаются начальные (для тихой воды) и текущие мгновенные положения гидростатических центров и центров силовых реакций подвижного корпуса.

Так, полупрозрачный корпус галеона «Васа» в режиме визуализации «Контурь шпангоутов...» (Рис. 29) открывает поверхность действующей ватерлинии с проявлением цветных шариков и линий связи для действующих в данный момент времени гидростатических центров. В режиме «Полупрозрачная тень...» корпус прорисовывается с почти невидимой обшивкой, и такие центры сил, вращений и метацентры уже ничем не укрываются.

Первым внутри корпуса корабля прорисовываются оси корабельного базиса  $\{ x, y, z \}$  – локальной системы координат, опирающейся на дина-

мический центр пространственного движения корабля – центр силовой реакции корпуса. Базис отмечается белым шариком и соединяется утолщенной стрелкой с шариком поменьше – интегральным центром действия внешних сил.

Затем изображается треугольный «флажок» начальной остойчивости: синий нижний угол: **C** – исходный центр величины; выше: **G** – серый центр масс корабля; на той же вертикали третья точка: **M** – метацентр начальной остойчивости подкрашивается в зеленый цвет при повышении метацентрической высоты, в желтый – при уменьшенной положительной величине, и в красный – когда остойчивость становится отрицательной; четвертая точка голубая: **F** – это исходный центр площади ватерлинии на тихой воде (*на симметричном корпусе все точки могут выстраиваться по одной вертикали*).

Из указанных центров начальной остойчивости, в тех же цветах направляются стрелки к действующим на данный момент центру величины погруженного объёма корпуса, к новому мгновенному центру площади ватерлинии и к действующему на данный момент метацентру, отсчитываемому строго по вертикали от центра величины на величину поперечного метацентрического радиуса  $r = J / W$  [м], как частного от момента инерции площади действующей ватерлинии  $J$  [м<sup>4</sup>] с делителем по исходному водоизмещению корабля  $W$  [м<sup>3</sup>].

Геометрический центр корабля приходится на пересечение плоскостей мидельшпангоута, конструктивной ватерлинии и диаметральной плоскости корпуса. Этот центр никак не отмечается в пространственном изображении корабля, однако именно от него ведутся все отсчёты поступательных и угловых смещений корпуса. В частности, из этого центра строится цепочка точек маршрута движения корабля, помечаемого в каждый расчетный момент времени. В проведении вычислительного экспе-

римента желательно контролировать малость пространственного шага на маршруте движения корабля, и плавность образуемой траектории.

Важно заметить, что все эти метацентрические характеристики никак не задействуются в вычислительном эксперименте, и служат только в качестве кинематических и динамических иллюстраций к текущему состоянию корабля.

### ***3. «Корабль и трохоидальные штормовые структуры морских волн»***

В основном окне вычислительного эксперимента изображается корабль в окружении морского волнения. Здесь могут рассматриваться и настраиваться различные варианты штормового хода и управляемого маневрирования, с наглядным представлением взаимодействия корабля со штормовым волнением, на фоне активных гребней штормовых волн в составе групповых структур с девятью валами.

В верхней–левой части в верхней строке показывается информация о режимах воспроизведения морского волнения, в строке ниже краткое описание вычислительной модели гидромеханики корабля и его силового взаимодействия корабля с морским волнением, и в третьей строке – текущие навигационные данные: курс и рыскание (дрейф) корабля,

**Sea:** Вычислительный эксперимент, штормового маневрирования корабля в открытом море

F1 – краткая справка

F4 настройка волнового режима

F8 штормовая гидромеханика

§ « Управление ходом корабля »

<8/2> ± два узла вперёд/обратно

<7/9> ± румб влево/право полборта

<4/6> ± румб влево/вправо на борт

<1/3> ± крен 30° на левый/правый

<5/Alt> руль прямо/так держать

<0> стоп машина

§ « Настройки моделирования »

<Tab/Space> закраски/контуры

<Ctrl/+Shift> задержка или стоп

<стрелки•leftMouse> ориентация

<+Shift•rightMouse> смещение

<+Ctrl•(roll)> дальность, наклон

<<Del>+<Shift> исходный обзор

<BkSp> остановка волнения

скорость хода в узлах, по Фруду (Fr) и в отношениях длин корпуса и корабельных волн (Lw/L).

Меню <F4> «Вычислительный эксперимент» – здесь выполняется настройка методов визуализации, выбирается вычислительная модель штормового трохоидального волнения, устанавливаются характеристики морского волнения для трёх независимых условных структур, например: ветровых волн, активной зыби и пологих реликтовых валов от дальних ураганов.

В первой строке четыре варианта реализации групповых структур штормового трохоидального волнения для реализации вычислительного эксперимента по моделированию гидромеханики хода и маневрирования корабля в реальном масштабе времени:

«*Чистая штилевая морская поверхность*» (динамика и качка на тихой воде);

«*Математическая модель штормовых волн*» (гидростатическая постановка);

«*Трохоидальный вычислительный процесс*» (волна отражается от корабля);

«*Континуально-корпускулярные решения*» ( ... заложено на перспективу к тестированию текущих разработок);

Во второй строке выбор модели трехмерного трохоидального морского волнения или модели полных потоков для плоского длинноволнового процесса:

«*Высокие волны с дрейфовыми течениями*» (структуры трохоидальных волн);

| Вычислительный эксперимент           |       |            |             |
|--------------------------------------|-------|------------|-------------|
| Математическая модель штормовых волн |       |            |             |
| Высокие волны с дрейфовыми течениями |       |            |             |
| Раскраска сине-зелено-пенных склонов |       |            |             |
| Тёмная вода с освещенными оттенками  |       |            |             |
| Цуги:                                | длина | высота     | направление |
| Ветер:                               | 64 м  | 0.99\5.7 м | 190 град°   |
| Зыбь:                                | 104 м | 0.56\5.1 м | 160 град°   |
| Вал:                                 | 160 м | 0.25\3.6 м | 230 град°   |
| Расстояние от корабля:               |       | -640       | м           |

«*Поверхностные волны в полных потоках*» (аналог длинноволновых процессов).

Морское волнение временно отключается и восстанавливается вне меню по команде <**BkSP**>

Во третьей строке четыре варианта прорисовки волнового поля, которые вне меню переключаются по команде <**Tab**>:

«*Раскраска сине-зелёных-пенных склонов*» (цветовая раскраска волнения);

«*Сеточное покрытие в цветовой палитре*» (расчётная сетка волнового поля);

«*Разреженная сетка, сто контуров волн*» (сетка волн без полного покрытия);

«*Профили волнения по курсу и траверзу*» (сетка с векторами скоростей).

В четвёртой строке четыре варианта раскраски морских волн, исполняемых вне меню по команде <**Пробел**>:

«*Тёмная вода с освещенными оттенками*» (типовая палитра в световых лучах);

«*Светлая вода с выделением ватерлинии*» (раскраска гребней и ложбин волн);

«*Тёмная вода + три слоя исходных волн*» (результатирующее поле морского ...

«*Светлая вода с послойным разложением*» ... волнение + три структуры волн).

В первых двух вариантах изображение волн выполняется полупрозрачным, с видимой подводной частью корпуса корабля. В случае прорисовки трёх опорных волновых структур прозрачность снимается, чтобы четыре волновых поля не искажали расцветку друг друга.

В следующих строках меню приводятся параметры трех структур морского волнения:

«*Ветер*» – активные ветровые волны с обрушающимися гребнями;

«*Зыбь*» – свежая зыбь недавних штормовых условий в этой же морской акватории;

«*Вал*» – пологие реликтовые валы от далёких ураганов.

Здесь определяется длина, относительная или фактическая высота волн и направление их распространения из картушки компаса.

В последней строке показано «*расстояние до корабля*», из точки обзора до центра графической сцены в метрах. Изменение этой величины может использоваться вместо интерактивного перемещения графической сцены, и будет полезным при точной подстройке изображения волновых полей непосредственно из этого меню.

### ***Предустановка условий опытовых испытаний по штормовой мореходности корабля***

Проведение вычислительного эксперимента в программном комплексе «Aurora» реализуется в интерактивной графической среде. Систематизация начальных условий с протоколированием результатов вычислительных экспериментов возможны с использованием специальных ключевых записей в файлах исходной конфигурации (\*.vil = *vessel-initiation+logging*).

Aurora.vil – исходная настройка вычислительного эксперимента для всех цифровых моделей в рабочей директории. Предполагается, что в таком обобщающем файле могут устанавливаться геометрические настройки в динамических масштабах относительно размеров корпуса, в том числе по длинам и высотам волн в соотношениях со скоростью хода корабля, что требуется для быстрых оценок результатов сравнительных испытаний.

«Имя-модели».vil – начальная подстройка опытовых испытаний 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.

Конфигурационный файл \*.vil может содержать произвольные тексты, строки (абзацы) которого, по необходимости, могут начинаться с символов комментария «;» или «//» в первой позиции.

Значимая информация должна размещаться в целой строке, отмечаемой в самом начале ключевым словом с двоеточием. Порядок таких строк несущественен. За ключевым словом в строго определённом порядке следуют термины, числовые величины или индексы режимов, разделяемые запятыми. Последовательность запятых без данных означает пропуск информации, для которой ранее определяемые исходные значения не изменяются. В завершение строки, после всех параметров с запятыми может размещаться произвольный текстовый комментарий. Пропуск данных отмечается нужным количеством запятых, или обрывом строки, но в последнем случае нежелателен завершающий строковый комментарий.

Символом  $\surd$  –или отмечается возможность выбора вариантов физической размерности или масштаба для входного параметра.

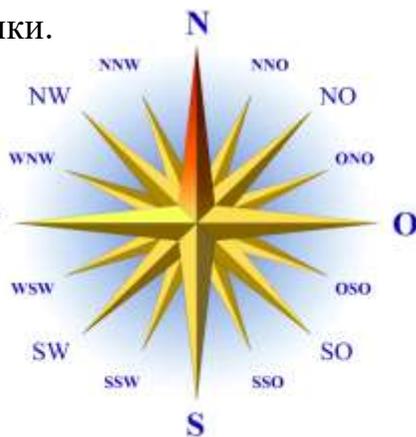
Значимые величины применяются в различных, ниже оговариваемых нотациях и физических величинах. Линейные размеры в абсолютных измерениях за числовой величиной должны отмечаться символами физических размерностей, как: «м»-метры; «дм»-дециметры или «см»-сантиметры.

Символ «Δ» означает отсутствие явного указания физических размерностей или отмечает безразмерные величины, измеряемые относительно оговоренных размерений длин волн или размерностей корпуса корабля. Аналогичные по сути величины могут отмечаться знаками % –

процента или ‰ – промили, например, для указания целочисленных значений в сотых или тысячных долях относительных размеров.

Угловые отсчеты отмеряются по часовой стрелке от направления северного меридиана, и могут задаваться в градусах, отмечаемых традиционными символами [ ° ' " ] слитно с цифрами. Как пример:  $-123^{\circ}45'56''789$ , либо в румбах [ ☀ √ \* ] навигационной картушки.

Четыре главных румба отмечаются одной прописной буквой или целым словом для указания сторон света: **Nord**, **Ost**, **Su"d** и **West**, разметка промежуточных курсов по картушке [ ☀ ] осуществляется с помощью буквосочетаний румбов навигационного курса с точностью  $11^{\circ}15'$  ( $11^{\circ}25'$ ), и аналогично для розы ветров – \* :



- N** √ Nord, NtO, NNO, NOtN, NO, NOtO, ONO, OtN,
- O** √ Ost, Ots, OSO, SotO, SO, SotS, SSO, StO,
- S** √ Su"d, StW, SSW, SWtS, SW, SWtW, WSW, WtS,
- W** √ West, WtN, WNW, NWtW, NW, NWtN, NNW, NtW.

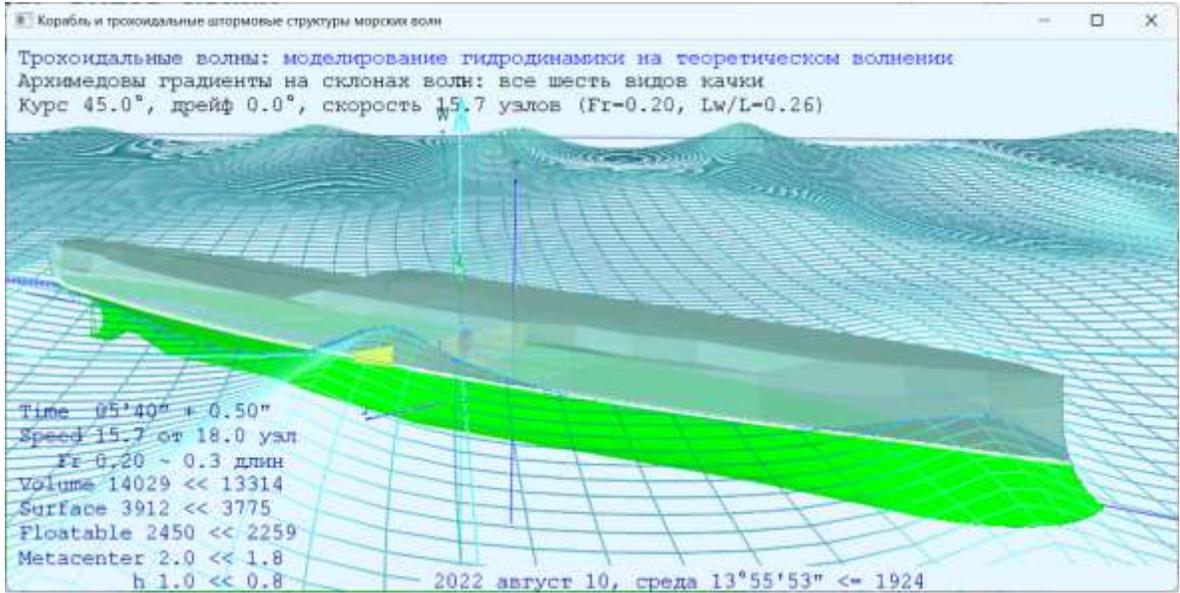
Ключевое слово «**Корабль:**» (или «**Ship:**») определяет указание требуемых курса и скорости хода корабля, его рабочие осадку и дифферент корпуса, и вариант математической модели гидромеханики взаимодействия корабля со штормовым волнением и ураганным ветром. В начальный момент корабль хода не имеет, и плавно разгоняется с выходом на экспериментальные показатели по ходкости на тихой воде, с учетом потерь хода или дельфинирования на склонах волн.

1 – курс [ ☀ √ ° ] – в румбах [ \* ] √ или в градусах [ ° ] в географических отсчетах от северного меридиана ( $+180^{\circ}$  на восток,  $-180^{\circ}$  к западу), градусные обозначения можно опускать (измерение углов в радианах здесь не предусматривается);

2 – *требуемая скорость хода* [ $\Delta \sqrt{\text{узл}} \sqrt{\text{м/с}}$ ] – в соотношениях длины корпуса с длиной корабельной волной по Фрудру:  $F_n = V / \sqrt{g \cdot L}$  [ $\Delta$  – без указания размерности];  $\sqrt{\text{узл}}$  или скорость  $V$  – в узлах, где одна угловая минута по меридиану или морская «равнообъёмная» миля в час [узл...];  $\sqrt{\text{м/с}}$  или как  $V$  [м/с] в стандарте длины метрового маятника с односекундными колебаниями на Парижской параллели. *Выполняется контроль*: максимальная скорость хода ограничивается до  $F_n \leq 0,8$  – ранее принимаемого контрольного ограничения опытовых и вычислительных экспериментов Ленинградского кораблестроительного института;

3 – *рабочая осадка* [ $\pm \Delta \sqrt{\text{м, дм, см}}$ ] – при явном указании знака числовой величины выполняется изменение осадки  $\delta T$  [ $\pm \text{м}$ ] – аппликаты конструктивной ватерлинии;  $\sqrt{\text{м}}$  иначе действующая осадка  $T$  [м] переназначается. В случае подводной лодки в подводном положении будет отслеживаться глубина управляемого погружения относительно конструктивной ватерлинии под условно невозмущенной поверхностью моря (*пока дорабатывается*). *Выполняется контроль* – осадка может быть только положительной.

4 – *дифферент* [ $\pm \Delta \sqrt{\% \text{‰}} \sqrt{\circ} \sqrt{\text{м}}$ ] – знак «+плюс» – дифферент на нос, знак «–минус» – на корму. Угловой отсчёт  $\psi$  [ $\pm \circ$ ] в градусах, или  $\sqrt{\text{м}}$  безразмерная величина относительно осадки, с возможностью масштабирования в процентах и промилях (тысячных долях), или непосредственно  $\sqrt{\text{м}}$  как размерная величина  $\delta d = (T_{\text{корма}} - T_{\text{нос}}) / 2$  устанавливается относительно полудлины корпуса по видимым изменениям уровня воды на марках углубления. В эксперименте дифферент создаётся путём фиксации абсциссы центра тяжести по однократно предвычисленному положению центра величины в начальный момент времени для опорных гидростатических вычислений. *Выполняется контроль*: дифферент не может превышать действующей осадки корпуса.



*Рис. 30. «Корабль и трогоидальные штормовые структуры морских волн» – воспроизведение морского волнения в опытовых изысканиях мореходности корабля в условиях штормового плавания. Контурные прорисовки профилей трогоидальных волн большой крутизны выполняются на фоне соизмеримой по высоте длиннопериодной зыби.*

5 – метacentрическая высота  $h$  [ $\Delta \nabla \% \nabla \text{м}$ ] – фактически определяет аппликату центра тяжести корабля  $zG = zM - h$  – относительно поперечного метацентра  $zM$  на тихой воде. Задается в долях заданной ширины корпуса [ $\Delta \nabla \%$ ], или фиксируется<sup>11</sup>  $h$  [м] – в метрах (к примеру, для регистровой перестраховки в 0,5 м). Для ширококорпусных судов и катамаранов геометрический метацентр поднимается чрезмерно высоко, и поднимает вслед за собой расчётный центр тяжести модели. Во избежание сложностей, начальная аппликата центра тяжести ограничивается величиной осадки корпуса над ватерлинией.

Интерактивный выбор метacentрической высоты в процессе вычислительного эксперимента никак не ограничивается.

<sup>11</sup> Российский морской регистр судоходства перестраховывается величиной минимальной метacentрической высоты  $h \geq 0,5$  м, отчего штормовая мореходность среднетоннажного судна утрачивается на ранних этапах проектирования. Запрет отрицательной начальной остойчивости грозит опрокидыванием.

6 – код выбора модели гидромеханики корабля в силовом взаимодействии с морским волнением:

- 0 динамическое позиционирование корпуса со скольжением по хордам пяти точек на склонах волн (на четырех треугольниках);
- 1 штормовая динамика корабля в условиях переменного водоизмещения с перепадами уровней моря на противоположных бортах (гидростатическая постановка на волну);
- 2 гидродинамика корабля с использованием прямых вычислений давления воды в толще под трохoidalным волнением на море по всей смоченной поверхности судовой обшивки, включая надводный борт, палубы и надстройки;
- 3 ++ к распределению давлений по судовой обшивке добавляются вихреисточники, моделирующие условия непротекания с импульсами отражения корабельной волны при поступательном движении корпуса корабля;
- 4** ++ вихреисточники на поверхности судовой обшивки модифицируются с учётом скоростей течений в морской толще под гребнями трохoidalных штормовых волн

7 – фактор асимметрии распределения истоков и стоков по смоченной обшивке корпуса при моделировании условий непротекания. По умолчанию принимается величина:  $kV = 0,5$ .

8 – ключ кинематического захвата корпуса корабля с усредненной по объёму скоростью в потоках воды под поверхностью интенсивного волнения. По умолчанию в эксперименте увлечение корабля волновыми потоками включено: *Flow = true*, и задействуется при условии эксперимента на трохoidalном волнении с распределенными по судовой обшивке вихреисточниками. Включение режима выполняется указанием логической единицы 1(true), исключение – 0(false).

Два числовых вектора: «**Демпфирование :**» («**Damp :**») – факторы затухания скоростей поступательных и угловых колебаний корпуса. Задаются парой векторов, разделяемых одной запятой между тройками чисел. В начальных условиях, принятых по умолчанию как:

$\mu : \{ \vartheta=0,2 \ \psi=0,6 \ \chi=0,8 \}$  – для бортовой, килевой качки и рыскания;

$\mu : \{ \xi=0,1 \ \eta=0,8 \ \zeta=0,6 \}$  – продольной, поперечной и вертикальной качки

В штормовой качке действует гидромеханический парадокс вязкого действия внешних скоростных потоков под гребнями волн, особо влияющих на днищевые и бортовые кили, крылья рулей и др. Потому целесообразно применить гашение больших скоростей качки в кубической зависимости с двукратным пределом.

$$V \times = \left(1 - 0,5 \cdot \tanh(\mu \cdot V^2 \cdot \delta t)\right) \cdot \frac{(1 - \exp(\mu \cdot \delta t))}{\mu},$$

где  $V$  – скорость качки;  $\mu$  – фактор демпфирования;  $\delta t$  – расчетный шаг времени.

На расчетных площадках с отрицательным фактором отраженных потоков действует парадокс Даламбера по взаимокompенсации источников и стоков из условий непротекания.  $K_v = 0,5$  – доля стока внутрь обшивки.

Строка «**Эксперимент:**» («**Test**») состоит из последовательности ключей управления записями результатов эксперимента. При отсутствии этого раздела в исходных настройках программы включена регистрация всех параметров с записью каждого из обнаруживаемых экстремумов.

При активации раздела «**Эксперимент:**» без параметров все ключи регистрации очищаются.

Среди ключей может указываться интервал времени для графиков в окне «Аксонметрический вид корпуса корабля и профилей морских волн», если за числом указывается размерность « " » - секунды или

«'» - минуты. Минимальный интервал ограничивается в 12" секунд, верхний предел не контролируется.

Одновременно все ключи регистрации инициируются словом «**всё**», при обнаружения которого другие специальные ключи инвертируются в режим исключения указываемых ими параметров.

Основная таблица протокола организуется подборкой ключей из произвольной по порядку последовательности слов: «**ход**»кость, «**рыск**»ание, «**верт**»икальная, «**борт**»овая и «**кил**»евая качка; ускорения в «**корм**»е, на «**мид**»еле и по «**нос**»у, в которых поиском выбираются отмеченные буквосочетания.

Первые два столбца таблицы содержат значения текущей скорости «**ход**» с действующим курсом, относительно которых регистрируются максимальные разгоны и потери скорости хода, а также «**рыск**»ания – как отклонения от заданного курса.

Следующие три ключа связаны с качкой корпуса, имеющих собственные периоды колебаний гравитационного действия. Это «**верт**»икальная, «**борт**»овая и «**кил**»евая качка.

Оставшиеся три ключа предназначены для регистрации экстремумов по вертикальным ускорениям в «**корм**»овой части корпуса, в районе «**мид**»еля и на форштевне в «**нос**»овой оконечности. Всего восемь ключей: «**ход**», «**рыск**», «**верт**», «**борт**», «**кил**», «**корм**», «**мид**» и «**нос**», а также указание «**всё**», от которого инвертируется действие восьми специальных ключей.

С целью сокращения объема протокола можно задействовать ключ разрешения записи только для наи«**больш**»их значений из регистрируемых экстремальных событий. При отсутствии ключа «**больш**» в протокол последовательно заносятся все максимумы измеряемых в ходе эксперимента числовых величин.

Ключевые слова «**Волна :**», «**Зыбь :**» и «**Вал :**» («**Wave :**», «**Swell :**» или «**Surge :**») начинают определение характеристик для трёх одновременно действующих групповых структур штормового трохoidalного волнения на море:

1 – *длина волны*  $\lambda$  [ $\Delta \vee \text{м} \vee \text{'}$ ] – в долях от длины парохода  $\lambda/L$  [ $\Delta$ ],  $\vee$  в метрах  $L$  [м] или  $\vee$  в секундах периода гребней волн  $\tau$  [ $^\circ \text{'}$ ] относительно неподвижной точки на поверхности воды;

2 – *высота волны*  $\zeta_w$  [ $\Delta \vee \% | \% \vee \text{м}$ ] – в долях от максимальной высоты обрушающегося гребня [ $\Delta$ ], или  $\vee$  в процентах и промилях в отношении к осадке корпуса корабля [ $\% | \%_0$ ], или  $\vee$  по расчетной высоте<sup>12</sup> в метрах [м],

3 – *направление распространения пакета волн* [ $\odot \vee ^\circ$ ] – может задаваться в румбах [\*] или  $\vee$  в градусах [ $^\circ$ ] от северной ориентации меридиана с отсчетом направления из картушки<sup>13</sup> компаса;

4 – *номер* или фазовой отсчёт первого вступления фронта трохoidalной волны. 0 – нулевая фаза волны на границе опытового бассейна в разностной схеме волнения, или по миделю испытуемого корабля при математическом описании недеформируемых волновых структур; «+№» – ожидание пропускаемых №-волновых гребней; «-№» – предварительный запуск № волн в акваторию или за мидель корпуса корабля, соответственно.

Строка настройки «**Море :**» («**Sea :**») – определяет размеры числового испытательного бассейна и режимы моделирования морского волнения.

1 – *длина и ширина акватории* [ $\Delta \vee \text{м}$ ] задается в отношениях к длине корпуса цифровой опытовой модели  $Long/L$  [ $\Delta$ ], или  $\vee$  в абсолютных измерениях  $\lambda$  [м] в метрах. Размерность указывается следом за двумя чис-

<sup>12</sup> Расчетная высота волны – удвоенный радиус трохoidalной траектории на уровне невозмущенной поверхности воды.

<sup>13</sup> Направление ветра задаётся внутрь картушки компаса, откуда ветер видится; волны бегут из картушки по видимому с борта судна направлению.

лами длины и ширины бассейна только один раз; при отсутствии размерности – числа означают отношение к длине корпуса  $Long/L$  [ $\Delta$ ]. *Выполняется контроль*: протяженность акватории должна превышать четыре длины корпуса, ширина – не менее утроенной длины корабля;

2 – модели генерации, свободного распространения и отражения от корпуса корабля штормовых волн:

0 чистое штилевое море без волнения и ветра;

1 чисто теоретическая модель гидродинамики штормового волнения с трохoidalной стратификацией скоростей подводных потоков воды;

2 вычислительный эксперимент в дифференциальных разностях для волновых уравнений, с разделением аппроксимаций по изменениям уровня моря и подводных скоростных потоков. Ведется отработка дисперсионных соотношений для моделей волнения с групповыми структурами и стоячими девятиными валами. Ввиду сложностей отражения волн от быстродвижущихся элементов бортовой обшивки корабля, визуализация корабельных волн временно отключена.

3 континуально-корпускулярный процесс штормовой гидромеханики корабля (*в разработке*).

3 – тип разностной схемы моделирования штормового волнения.

0 модель поверхностного волнения в полных потоках с равномерными узлами сетки необходима для отладки дифференциальных разностей и визуального выявления проблем пространственной аппроксимации с более простыми условиями устойчивости на неравномерных узлах расчётной сетки;

1 трёхмерный трохoidalный процесс с динамически распределением расчетных узлов со значительно различающейся геометри-

ей смежных ячеек в аппроксимациях волновых полей и подводных пространств.

Первые две строки файла \*.vii условно, могут представляться текстом заголовка с подзаголовком к планируемым испытаниям мореходности корабля, и затем использоваться в описаниях к результатам вычислительного эксперимента.

При пропуске иницирующих данных в конфигурационных записях, в вычислительном эксперименте задействуются предустановки исходной инициализации внутренних конструкторов программы «Aurora», что будет соответствовать следующим записям начальной настройки вычислительного эксперимента:

**Корабль:** 0°, 0, 0, 0, 1 – скорость хода, курс, дополнительная нагрузка (осадка), дифферент, метацентрическая высота и модель гидромеханики;

**Демпфирование:** 0.1 0.8 0.6, 0.2 0.6 0.8, 0.5 {  $\xi$   $\eta$   $\zeta$  }<sub>м</sub>, {  $\vartheta$   $\psi$   $\chi$  }, Ср – первые две тройки чисел по абсциссе-ординате-апликату, и затем по бортовой, килевой качке и рысканию,

– после второй запятой указывается фактор компенсирующего силового противодействия гидродинамическим импульсам сил в соответствии с проявлением парадокса Даламбера по отрицательному давлению на элементарных площадках судовой обшивки и выступающих частях корпуса.

**Эксперимент:** интервал графиков - 12”, наибольшее «всё»: скорость хода, курс и рыскание; вертикальная, бортовая и килевая качка; ускорения в корме, на миделе и по носу.

**Море:** 800 720 м, 1, 1 – размеры акватории и варианты штормового волнения

**Волна:** 64 м, 0.9, -165°, 0 свежая ветровая волна с обрушающимися гребнями

**Штормовая мореходность и маневренность корабля <прямой вычислительный эксперимент>**  
 Ленинград, Кораблестроительный институт \ Санкт-Петербург, Государственный университет,  
 Научно-инженерное общество судостроителя имени А.Крылова - штормовая мореходность  
 «МИДВ» ©72-2023 Сызрань-Калининград-Севастополь-Ленинград-Владивосток-Сахалин-П'л'ψ'л' В.Храмушин  
**Корабль:** OtN, 9 узлов, 0 м, 0°, 50%, 4, 0.5, true — курс, скорость хода, посадка, дифферент,  
 ... метацентрическая высота и модель гидромеханики [0÷4], исток/сток, поток волны eng: (Ship)  
**Демпфирование:** 0.1 0.8 0.6, 0.2 0.6 0.8 — демпфирование по абсциссе, ординате и аппликате,  
 ... по бортовой, килевой качке и рысканию (Damp)  
**Эксперимент:** 12" всё, большее, ход, рыскание; вертикаль, бортовая, килевая (корма, мидель, нос) (Test)  
**Море:** 800 720 м, 1,1 — Размеры числовой акватории и варианты генерации штормовых волн (Sea)  
**Волна:** 64 м, 0.6 м, StW, 0 — Свежая и крутая ветровая волна с обрушающимися гребнями =6м (Wave)  
**Зыбь:** 100 м, 0.4 м, SSO, 0 — Наиболее интенсивное, ранее сформировавшееся волнение =4 м (Swell)  
**Вал:** 160 м, 0.3 м, SWTW, 0 — Реликтовое пологое волнение от совсем дальних ураганов=3 м (Surge)  
 (пустая строка → разделить)

**Корабль** - установка курса и скорости хода корабля, осадки, дифферента и волновой гидромеханики  
 course [°|\*] установка начального курса в градусах [°] или румбах из картушки компаса [\*]  
 speed [Δ|узл|м/с] скорость хода по Фруду, в [узл]ах или [м/с] по тяге двигателей на тихой воде  
 действует ограничение 0,8 по Фруду, но может преодолеваться интерактивно  
 draught [±м|m] при указании знака числа - изменение осадки, иначе её переназначение текущей  
 trim [±°|±m] дифферент в угловой мере [±°], или по изменениям посадки в оконечностях [±m]  
 hX [Δ%|м] метацентрическая высота в долях ширины корпуса или по абсолютной величине [m]  
 statum 0 позиционирование корпуса со скольжением по хордам пяти точек на склонах волн  
 ⇒ 1 штормовая динамика корабля под воздействием сил гидростатического всплытия  
 2 динамика корабля с моделями гидростатического давления на смоченной обшивке  
 3 вихреисточники скользющего потока с импульсами отражения от корпуса корабля  
 4 ÷ ≈ набегающий поток дополняется скоростями течений под гребнями штормовых волн  
 Kv: [0.5] — фактор парадокса Д'Аламбера; [0÷1[ - к условию непротекания сток/исток  
 Flow [true|1√0] вовлечение в независимую кинематику волновых потоков; false - чисто динамика  
**Демпфирование:** -- факторы затухания скоростей поступательных и угловых колебаний корпуса.  
 μ : { ξ=0,1 η=0,8 ζ=0,6 } - пульсащий ход, поперечных сдвигов и вертикальной качки;  
 μ : { θ=0,2 ψ=0,6 χ=0,8 } - для бортовой, килевой качки и рыскания на курсе.  
**Эксперимент:** — настройка эксперимента в целом, активация регистрируемых экстремальных событий  
 12 ["'|'] установка продолжительности графиков с кинематическими замерами качки корабля  
 «всё» выбор сразу всех событий, и теперь ключевые слова будут служить для исключения  
 «ход»кость регистрация скорости хода с разгонами и потерями относительно заданной  
 «рыск»ание курс с наблюдениями за экстремальными отклонениями от заданного направления  
 «верт»икальная, «борт»овая и «кил»евая качка - возбуждающаяся под действием гравитационных сил  
 в «корме», на «миде»ле и по «нос»у- вертикальные ускорения, нормированные свободным падением g  
 наик«больш»ие - в протоколе отмечаются наибольшие из экстремальных событий, иначе все максимумы  
**Море:** — Размеры акватории для вычислительного эксперимента и выбор модели штормового волнения  
 long wide [Δ|%|м] протяженность и ширина акватории в метрах [m] или относительно длины корабля  
 wave 0 чисто штилевое море без волнения и ветра  
 ⇒ 1 чисто теоретическая модель гидродинамики штормового трохоидального волнения  
 2 вычислительный эксперимент в дифференциальных разностях с отражениями волн  
 3 континуально-корпускулярный процесс штормовой гидромеханики корабля на волне  
 peak 0 модель поверхностного волнения в полных потоках с равномерными узлами сетки  
 ⇒ 1 трёхмерный трохоидальный процесс с динамически распределяемыми ячейками  
**Волна:** **Зыбь:** и **Вал:** — Характеристики трёх групповых структур штормового трохоидального волнения  
 length [Δ|m|"] длина относительно корпуса корабля [Δ], в метрах [m] или период во времени ["]  
 height [Δ|%|m] высота относительно обрушающегося гребня [Δ], в процентах от осадки корпуса,  
 или собственно в метрах в отношении удвоенного трохоидального радиуса [m]  
 dir [°|\*] направление распространения пакета волн в градусах [°] или румбах [\*] компаса  
 phase ⇒ 0 начальный отсчет номера/фазы трохоидальной волны: (+) - в ожидание (-) - пропуск

Стороны света и буквосочетания румбов компаса: 11°15'=(11°25) (и розы ветров)  
 N √ Nord, Nto, NNO, NotN, NO, NotO, ONO, OtN,  
 O √ Ost, OtS, OSO, SotO, SO, SotS, SSO, StO,  
 S √ Su'd, StW, SSW, SwtS, SW, SwtW, WSW, WtS,  
 W √ West, WtN, WNW, NwtW, NW, NwtN, NNW, NtW.  
 Пример — ~~~~~  
 Корабль: NotO, 0.4, -0.1 м, -3°, 0.1, 1 — курс, V, T, δT, и модель гидромеханики  
 Демпфирование: .1 .8 .6, .2 .6 .8, .5 — μ: {ξ η ζ}, {θ ψ χ}, Kv гашение скоростей и потоков  
 Эксперимент: 12" отсчёты наибольшие [всё]: ходкость, рыскание, вертикальная, бортовая, килевая качка  
 ++ ускорения в корме, на миделе и по носу, + 30" графиков  
 Море: 6 4, 1,1 — Размеры акватории и варианты генерации штормовых волн  
 Волна: 1, 0.92, -165°, 0 — Свежая крутая ветровая волна с обрушающимися гребнями  
 Зыбь: 1.6, 0.44, 160°, 0 — Наиболее интенсивное, ранее сформировавшееся волнение  
 Вал: 2.4, 0.24, -130°, 0 — Реликтовое пологое волнение от совсем дальних ураганов

**Рис. 31. Файл конфигурации вычислительного эксперимента “Aurora.vil” со-  
 держит описание всех настраиваемых параметров.**

**Зыбь:** 100 м, 0.44, 160°, 0 интенсивное, ранее сформировавшееся волнение

**Вал:** 160 м, 0.2, -130°, 0 реликтовое пологое волнение удалённых ураганов

В рабочей директории может предусматриваться общий файл с именем «Auroga.vil» для предварительной инициализации цифровых моделей, который будет первым заменять принятые по умолчанию исходные параметры и условия проведения вычислительного эксперимента в комплексе «Auroga».

В файле – образце, составленном при разработке программного комплекса, содержится все варианты конфигурационных записей для построения вычислительного эксперимента, сопровождающиеся полным листингом необходимых кратких пояснений и примером.

Для временного отключения именованной записи конфигурации достаточно в начале строки использовать любой символ, например ' ; ', или исказить ключевое слово, например, отодвинув пробелом двоеточие ' : '.

### *Результаты опытовых мореходных экспериментов*

Окончанием конфигурационных записей является любая пустая строка или завершение текстового файла. При использовании иницирующих настроек для конкретной модели корабля, в конец файла или после первой пустой строки, начинается запись протокола с полным комплексом исходных данных и строками регистрации динамических параметров корабля для экстремальных событий по любому из измеряемых параметров.

Для получения протокола с результатами эксперимента без какого-либо изменения исходных условий моделирования, например предупре-

делённых в файле «Аугога.vil», можно разместить в рабочей директории произвольный файл с именем цифровой модели и расширением <\*.vil>.

**Краснознамённый ордена Октябрьской революции крейсер I ранга «Аврора» Тихого океана Штормовая мореходность и маневренность корабля <Прямой вычислительный эксперимент>**

**Корабль:** OtN,9 узл,0 м,0°, 50%, 4 - курс, скорость хода, осадка, дифферент eng:(Ship) ... метацентрическая высота и модель гидромеханики  
**Демпфирование:** 0.1 0.8 0.6,0.2 0.6 0.8,0.5-демпфирование по абсциссе,ординате, аппликате ... по бортовой, килевой качке и рысканию, и доля в стоке потока (Damp)  
**Море:** 800 720м,1,1-Размеры числовой акватории и варианты генерации штормовых волн (Sea)  
**Волна:** 0.75,0.8,StW,1-Свежая и крутая ветровая волна с обрушающимися гребнями=6м(Wave)  
**Зыбь:** 100м,8м,SSO,0 -Наиболее интенсивное, ранее сформировавшееся волнение =4м(Swell)  
**Вал:** 160м,4м,SWTW,0 -Реликтовое пологое волнение от совсем дальних ураганов=3м(Surge)

Штормовая мореходность корабля (вычислительный эксперимент)

~~~~~

2024 апрель 29 понедельник 12°03'16"

Краснознамённый ордена Октябрьской революции крейсер «Аврора»

эксперимент, в записях регистрация всех экстремальных событий:

ход,рыскание,вертикальная,бортовая и килевая; ускорения в корме,на миделе,по носу акватория: { 800×720 м } [268·241]~δS=3.00 м, { δt=0.5"/4.2 } [0]

⇒ Краснознамённый ордена Октябрьской революции крейсер «Аврора»

⇒ { L=123.7, B=16.8, T=6.4, Ψ= 00'\δd=0см } ^6.4 K(a.103<шп[147]>113.ф)

⇒ { δ=0.51, W=6797.9 м³, S=2565.4 м², F=1428.7 м² }

⇒ C{ x=1.2, z=-2.67 }, zG=-0.04, r=3.47, h=0.84 [м]

⇒ Демпфирование: μV{ ξ=0.10,η=0.80,ζ=0.60 }; μω{ θ=0.20,ψ=0.60,χ=0.80 }, Kv=0.5

⇒ Гидромеханика [4]: Давление с волновыми и ходовыми потоками воды

Волна: λ= 93 м, τ=7.7", ζ=10.00 м,α=0.90, C=12.0 м/с, A=191°, δS=6.0 м [134·120]

Зыбь: 100 м, 8.0", 0.00 м, =0.00, 12.5 м/с, 158°, 6.2 м [130·116]

Вал: 160 м, 10.1", 0.00 м, =0.00, 15.8 м/с, 230°, 7.9 м [102·92]

⇒ моделирование гидродинамики на теоретическом волнении (трохоидальный процесс)

⇒Время Kt⇒скорость,узел.курс↑рыскание руль Z миделя↓волн бортовая килевая корма мидель нос

00"35/3 ⇒ V±ξ 4.3+4.7 ±χ 78°8-0°1 † ·ζ+0.1†+0.9 ·θ-0°0 ·ψ-0°0 «+0.1 ·+0.1·+0.1»

00"59/5 ⇒ V±ξ 4.3+4.7 ±χ 78°8-0°1 † ·ζ+0.2†+0.8 ·θ-0°1 ·ψ-0°0 «+0.1 ·+0.0 -0.0»

01"53/13 ⇒ V±ξ 4.4+4.6 ±χ 78°8-0°6 † ·ζ+0.5†+0.2 ·θ-0°5 ·ψ+0°4 «-0.0 ·-0.1 -0.2»

12'23"59/105 ⇒ Демпфирование: μV{ ξ=0.10,η=0.80,ζ=1.60 }; μω{ θ=0.20, ψ=1.60, χ=0.80 }, Kv=0

12'23"85/109 ⇒ ±ξ 5.2+3.8 ±χ 78°8+5°9 ЛМ ·ζ-0.3†-0.1 ·θ-4°4 ·ψ-1°8 «·-0.2·+0.0 ·+0.2»

12'23"96/110 ⇒ ±ξ 5.2+3°8 ±χ 78°8+6°1 ЛМ ·ζ-0.1†+0.1 ·θ-3°9 ·ψ-2°0 «·-0.1·+0.0 ·+0.2»

25'22"17/129 ⇒ << успешное завершение >>

скорость хода ±ξ [м/с] -14.79 < -0.00 > +18.89

рыскание на курсе ±χ [°] 50.47 < +0.10 > -0.70

вертикальная качка ±ζ [м] -0.34 < +0.00 > +0.36

бортовая качка ±θ [°] -30.00 < -0.01 > +22.88

килевая качка ±ψ [°] -0.24 < -0.00 > +0.23

ускорения по корме {a/g} -0.07 < -0.00 > +0.06

[м/с²/g] на миделе {m/g} -0.07 < +0.00 > +0.07

- - у форштевня {f/g} -0.12 < +0.00 > +0.11

Рис. 32. Файл конфигурации конкретной цифровой модели автоматически дополняется протоколом испытаний.

Файл может быть пустым или содержать произвольный текст с описанием эксперимента и без пустых строк, который будет предшествовать записям журнала мореходных испытаний.

Протокол начинается с полного описания исходных данных и условий моделирования, задействуемых на момент начала вычислительного эксперимента.

- дата и компьютерное время начала вычислительного эксперимента;
- название корабля, участвующего в мореходных испытаниях;
- действующий режим ведения опытового журнала, как выбираются экстремальные события, и какие параметры могут создавать записи текущего состояния корабля;

- размеры акватории в {метрах} и количестве [узлов];

$\delta S \approx Kt \cdot V_w \cdot \delta t$ [М] – пространственный шаг квадратных ячеек расчетной сетки определяется на основе критерия устойчивости (Найквиста) по заданному интервалу времени δt [сек], с учётом фазовой скорости моделируемой волны V_w и некоторого увеличивающего множителя Kt – коэффициента кратности для предотвращения сложных факторов неустойчивости в ускоряемых процессах взаимодействия волн с движущимся кораблём. Величина Kt указывается за косой чертой при δt .

В следующем блоке приводятся геометрические и гидромеханические характеристики корабельного корпуса, начиная с:

⇒ названия с кратким описанием корабля, и представляемого настоящим протоколом опытового эксперимента.

⇒ L, B, T – расчетная длина, ширина и осадка корпуса. Ψ – дифференциал в градусной мере и в сантиметрах разница осадок носом и кормой. Положительная величина – это дифференциал с погружением носа и всплытием кормы, при этом корпус раскрашивается со сменой цветов по конструктивной ватерлинии, а новая ватерлиния с учётом дифференциала наносится жирной линией по условиям погружения на тихой воде. За скобкой размерностей корпуса приводится величина дополнительного погружения относительно конструктивной осадки. В угловых <скобках> в заверше-

нии строки – количество аппроксимирующих точек на ахтерштевне, затем – количество <шпангоутов> и количество – точек форштевня.

⇒ δ – коэффициент общей полноты корпуса; W [m^3] – водоизмещение; S [m^2] – площадь смоченной поверхности корпуса; F [m^2] – площадь ватерлинии на спокойной воде.

⇒ $C\{x, z\}$ – абсцисса и аппликата центра величины; zG – аппликата центра тяжести и r – метацентрический радиус для заданной метацентрической высоты h [m].

⇒ В скобках термин «гидромеханика» указывает выбор режима моделирования динамики корабля под воздействием штормовых волн:

0 – Кинематика качки в 4-х точках на склонах волн *скольжение*

1 – Объёмная плавучесть переменного водоизмещения *гидростатика*

2 – Давление смоченных элементов бортовой обшивки *гидродинамика*

3 – Давление на встречном потоке без морских волн *ход корабля*

4 – Давление с волновыми и ходовыми потоками воды *действие волн*

⇒ В завершение блока описания корпуса приводятся действующие факторы демпфирования скоростей качки μ по поступательным $\{\xi, \eta, \zeta\}$ и угловым $\{\theta, \psi, \chi\}$ движениям корабля.

В третьем блоке исходной информации расписываются параметры трех групповых структур морского трохoidalного волнения. Предполагается, что морское волнение моделируется с помощью активного ветрового волнения «Волна», в которое включается ассиметричная поправка для увеличения крутизны подветренного склона волн. Две системы зыби могут описывать недавно зародившиеся крупные волны в том районе плавания «Зыбь», а также влияние пологих валов от дальних штормов «Вал».

В информационных записях приводятся λ [m] – длина и ζ [m] – высота максимального гребня в волновом пакете; безразмерная величина α – отношение заданной высоты волны к максимально возможному – обрушающемуся трохoidalному гребню; A [$^\circ$] – направление движения волн.

нового пакета; τ [сек] – период и C [м/с] – фазовая скорость движения фронта волны;

С каждым из трёх волновых полей связываются собственные сеточные акватории для разностного моделирования в рамках волновых уравнений, чем обеспечиваются соразмерные критерии моделирования для свободного распространения и отражения волн от подвижного корпуса корабля. δS [м] – шаг и [количество] узлов сеточной области.

⇒ в завершение блока параметров волновых полей даётся строка описания включаемой математической модели для проведения вычислительного эксперимента¹⁴:

- 0 – чистое штилевое море без волнения и ветра;
- 1 – моделирование гидродинамики на теоретическом волнении;
- 2 – вычислительный эксперимент с отражением волн от корпуса;
- 3 – эксперимент с учётом скоростей течений и дисперсией волн.

В скобках указывается тип волновой модели (3D трохоидаальный процесс) при использовании регулярных неравномерных сеток с трохоидаальным распределением локальных уровней и скоростей потоков по всей глубине водной толщи; (2D поверхностный поток) – для простых волновых уравнений на строго равномерной поверхностной сетке с квадратными ячейками, в которых вертикальная стратификация скоростных потоков и давления воды учитываются в рамках математических зависимостей для волн Герстнера.

В процессе интерактивного проведения мореходного вычислительного эксперимента допускается изменение условий моделирования, различных характеристик морского волнения, включая осадку корпуса и другие

¹⁴ Действующая версия комплекса «Аигога» отлаживается на трохоидаальной математической модели морского волнения. В моделях на разностных схемах временно отключен процесс отражения волн ввиду высокочастотных доплеровских эффектов с нарушениями аппроксимационных критериев у быстро движущейся обшивки корпуса корабля.

параметры состояния корабля, что обязательно отображается отдельными строками в текстовом протоколе.

Основной же объем протокола образуется записями событий с экстремальными значениями специально регистрируемых параметров:

1 – время начала или возобновления эксперимента и номер шага расчётов;

2 – $\bullet \pm \xi$ [узлы] – текущая скорость хода и её различие с заданной;

3 – $\bullet \pm \chi$ – заданный курс и рыскание или отклонение от курса;

4 – положение руля: «л» – на левый \vee или «п» – на правый борт:

• – $\langle _B \rangle$ лево \vee право на борт, и обратный курс за 30 секунд.

• – $\langle _P \rangle$ руль лево \vee право полборта, с выходом на обратный курс за 1 минуту.

• – $\langle _M \rangle$ помалу лево \vee право используется авторулевым при отклонении от заданного курса более одного румба, с выходом на обратный курс за 2 минуты.

На крупном волнении такой авторулевой не всегда способен к выведению судна на заданный курс, тогда ему необходимо помогать перекладкой на борт или полборта вручную, с помощью изменения заданного курса, с возвратом к исходному по необходимости.

5 – $\bullet \zeta \pm \text{корпус} \int \pm \text{волна}$ – вертикальное смещение, высота волны на миделе;

6 – $\bullet \vartheta$ углы бортовой и $\bullet \psi$ – килевой качки в градусах;

7 – в трёх столбцах «корма мидель нос» приводятся отклонения от гравитационного ускорения в кормовой, средней и носовой частях корпуса корабля, нормированные по ускорению свободного падения. Так, для фиксации отрыва свободно лежащих предметов от палубы, в состоянии невесомости или ускоренного отталкивания, величина регистрируемого ускорения быть менее минус единицы ($a < -1$).

В случае успешного завершения вычислительного эксперимента в последней строке отпечатывается его длительность с фразой «успешное завершение», также означающей отметку конца и закрытие текстового файла протокола:

```
<< 04'06" успешное завершение >>
```

III. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРЯМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В ТЕОРИИ КОРАБЛЯ И ГИДРОМЕХАНИКЕ ШТОРМОВОЙ МОРЕХОДНОСТИ

В штормовом вычислительном эксперименте с движущимся произвольным курсом и скоростью кораблём встраивается шесть моделей штормовой гидромеханики, с разделением и развитием опытов от простого к сложному; от базовых законов волнового воздействия до комплексных силовых влияний объёмной гидростатики и распределения давлений по обводам корабля с учётом ходового набегающего и волнового потоков со стратификацией скоростей течений по глубине:

1) – инерционное скольжение корпуса по взволнованной поверхности моря с условно естественным интерактивным управлением курсом и скоростью хода корабля;

2) – гидростатическая постановка основана на сопоставлении исходного водоизмещения с мгновенным распределением подводного объёма корпуса под поверхностью волн, с тем же управлением курсом и скоростью хода;

3) – поверхностное интегрирование величин давления жидкости на элементарных фрагментах бортовой обшивки, с учётом эксцентриситета точек концентрации сил давления;

4) – вовлечение в распределение давлений поправок по касательным и отражаемым компонентам ходового набегающего потока, для чего задействуются компенсирующие вихреисточники по всей поверхности судовых обводов;

5) – включение в гидродинамическое моделирование мгновенное распределение течений жидкости под склонами штормовых волн, по тем же правилам формирующих вихреисточники с интенсивностями касательно-скользящих и нормально-отражаемых компонент;

б) – в динамику свободного движения корабля включаются распределённые скоростные потоки под гребнями и подошвами волн, что формально означает захват корабля в несвободное волновое движение, с возникновением внутрикорпусных ускорений и силовых реакций без специальных оценок действующих извне сил.

В прорабатываемых вычислительных экспериментах задействуются три модели морского волнения: 1) штормовое волнение с чисто математическим описанием групповых структур трохоидальных волн с вертикальной стратификацией течений (*активен*); 2) моделирование в дифференциальных разностях трохоидальных колебаний, со свободным распространением и отражением волн от корпуса маневрирующего корабля (*в отладке*); 3) прямой вычислительный эксперимент с полноценным трохоидальным волнением на море, в том числе с учётом стратификации дрейфовых течений и дисперсии видимых и групповых скоростей волновых структур (*в проработке*).

Геометрические и динамические параметры штормовых волн для опытов с надводным кораблём воссоздаются сообразно наблюдениями за реальным штормовым волнением на море, которое наяву представляется ячеистыми структурами пакетов волн с быстро оседающими – условно стоячими гребнями обрушающихся девятых валов. Уменьшение крутизны и выполаживание склонов на границах волновых структур связывается с обращением фазовых отсчетов; ослабление крутизны в тройках центральных гребней означает удлинение протяженности волновых фронтов. Формально в квазитрёхмерной модели трохоидальных волновых структур соблюдаются требования сплошности жидкости, и в то же время исключается строго периодическое воздействие гребней штормовых волн, что важно в моделировании пространственной динамики воздействия сил волновой природы на корпус корабля в свободном надводном плавании.

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

В действующей на июль 2025 года версии программного комплекса «Аврора» незавершена отработка моделей девярых валов и шквальных ветров, что в целом не ограничивает использование прямых вычислительных экспериментов по предписанному назначению.

Актуальными остаются исследования относительно мгновенного положения подвижного центра гидродинамических давлений и присоединённых масс воды, образующих пары сил с гравитационной тяжестью корабля. Другой нетривиальной задачей видится обоснование моделей для среднеинтегрального захвата корпуса быстрыми потоками в гребнях штормовых волн, проявляющегося поступательными ускорениями на борту корабля с усилениями угловой качки относительно завывшения центра тяжести над центром концентрации сил давления окружающей жидкости.

Логическая формализация вычислительной задачи по моделированию штормовой гидромеханики корабля

Непротиворечивое проектирование с принципиальной возможностью доводки программного комплекса до уровня инженерного интерактивного графического комплекса для моделирования динамики корабля в реальном времени, как и любого другого сложного и технически завершенного произведения, требует предварительной проработки схемы независимого разделения моделирующих операций и физических явлений, как особых

предметов для проектной систематизации с возможностью будущего анализа получаемых результатов.

*Мореходный
вычислительный
эксперимент*

корпус:

волнение:

визуализация:

явления (существительные) или числовые объекты¹⁵

действия (глаголы) операции

геометрия:

**1.1
теоретический
чертеж**

1.2
цуги крутых тро-
хоидальных волн

1.3
алгоритмические
модели волнения

гидростатика:

2.1
остойчивость и
плавучесть

2.2
**силовое воз-
действие волн**

2.3
несвободная ди-
намика и качка

*гидромеханика
взаимодействия:*

3.1
излучение волн
корпусом ко-
рабля

3.2
трансформация
волн у подвиж-
ного борта

3.3
**гидромеханика
корабля в штормовом море**

Рис. 33. *Разделение вычислительного комплекса на условно независимые моделирующие операции и явления гидромеханики.*

Троичная логика служит такому однозначному синтезу вариантов численного представления физических явлений в моделировании реальных процессов гидромеханики корабля в штормовом море, сводимых из анализа условий непротиворечивого согласования и построения независимых программных блоков с алгоритмами корабельной гидромеханики и инженерной графики с интерактивным управлением вычислительными экспериментами в целом.

Логическая матрица формализует ключевые определения и вычислительные операции (Рис. 33) [16], разделяя алгоритмические разработки условно ортогональными элементами в общем функциональном про-

¹⁵ В интерпретации матрицы-проекта возможны аналогии с частями речи: **существительное**, прилагательное, числительное, местоимение, **глагол**, наречие, предлог, союз, частица, междометие, связываемые синтаксическими сущностями – членами предложения: **подлежащее**, определение, **сказуемое**, дополнение, обстоятельство и т.п.

странстве – по независимым направлениям в этапах построения, отладки и совершенствования моделей корабельной гидромеханики.

Сложные числовых структуры и методы их трансформации формализуются абстрактными метаязыковыми зависимостями в обобщениях декларативного и функционального программирования, с разрешение противоречий в понятиях естественной языковой логики, проецируемой на конкретные реализации методов программирования структур данных и алгоритмов. Обратные связи в троичной матрице служат проверке достижения целевых установок по эффективности всепогодного мореходства, как в изначальных проектных изысканиях, так и в проработке наставлений мореплавателям для конкретных гидрографических и гидрометеорологических условий мореходства.

Взаимосвязь физических явлений и нестационарных процессов гидромеханики синтезируется в независимых определениях троичной логики, в ортогональном базисе для отдельного описания физических явлений и процессов моделирования в инженерной задаче. Гидромеханика корабля во взаимодействии с интенсивным и нерегулярным морским волнением реализуется на основе явных численных схем, что важно для использования гибридных перестроений физических моделей и вычислительных алгоритмов в подобластях с асимптотической сшивкой разнородных математических и эвристических моделей. Своеобразные функциональные подходы необходимы для проведения сложных контекстно-зависимых вычислительных операций, моделирующих *нестационарное взаимодействие* фрагментов судовой обшивки с гидростатическими напряжениями и динамическими импульсами от гребней обрушающихся штормовых волн *теоретически предельной высоты (в нестационарной гидромеханике пока нет строгих аналитических зависимостей)*.

Непротиворечивая проектная логика обособляется элементами троичной матрицы, где по строкам располагаются некие «существительные» – как особые числовые структуры с декларативным представлением геометрических объектов и гидромеханических явлений; тогда взаимодействие и трансформация виртуальных объектов связывается программными действиями по столбцам, ассоциируемых с «глаголами» – математическими моделями гидромеханики под функциональными контекстно-зависимыми процедурами. Синтез числовых объектов с исполнительными алгоритмами в построении интерактивных опытовых испытаний расширяет возможности выбора архитектуры вычислительной техники, с перспективой вовлечения аналоговой моделирующей аппаратуры и систем телеуправления в составе штурманских экспертно-измерительных комплексов.

В логическом иероглифе (Рис. 33) по столбам матрицы отмечаются обобщенные объекты геометрического моделирования: 1 – корпус корабля; 2 – морское волнение и 3 – сцена для моделирования их взаимодействия и графической визуализации. Переходы между ячейками в столбах матрицы, как глаголы, соотносятся с алгоритмами методов геометрической трансформации виртуальных объектов, или с операциями моделирования физических процессов при участии условных предметов, существительных, как виртуальных числовых структур в смежных ячейках логической матрицы.

Ячейки с представлением обобщенных вычислительных алгоритмов и процессов моделирования располагаются по уровням сложности на строках логического иероглифа с метками: 1.x – геометрия; 2.x – гидростатика и 3.x – гидромеханика взаимодействия всех объектов вычислительного эксперимента.

1. Соответственно, верхняя строка матрицы формирует методы представления для; 1.1 – теоретического корпуса корабля и 1.2 – геометрического описания трохоидальных структур морского волнения, с которыми связано 1.3 – алгоритмическое представление моделей морского волнения в контексте воздействия на корпус корабля и наглядной визуализации результатов вычислительного эксперимента.

2. Вполне определенные и потому весьма сложные объекты формируют среднюю строку, в которой выстраиваются алгоритмы взаимного сосуществования: 2.1 – корпуса корабля; 2.2 – морского волнения, что вполне достаточно для моделирования; 2.3 – динамики корпуса корабля, без учета вызываемой им трансформации свободных трохоидальных волн.

3. Тогда в основании логической матрицы сформируются уточненные задачи нестационарной гидромеханики, определяющие: 3.1 – излучение корабельных волн; 3.2 – рефракцию, отражение и интерференцию морского волнения вблизи корпуса корабля, что формально завершает построение вычислительного эксперимента; 3.3 – моделирование гидромеханики корабля в штормовом море.

В целом проектная задача разделяется на отчасти освоенные инженерные решения, проблемные задачи, решение которых полагается принципиально возможным, а также непознанные к началу работ поисковые изыскания и чисто научные физико-математические исследования:

Аналитика (задел): геометрия и кинематика пространственных движений корпуса судна, его гидростатика на взволнованной поверхности моря с учетом распределенных источников излучения корабельных и отраженных волн (в том числе с возможностью перестроения затопляемых отсеков);

Гидромеханика (задача): эмпирическое моделирование потоков энергии в трохоидальных структурах штормовых волн с оценками рас-

пределенного силового воздействия на обшивку корпуса, с учетом динамической отражения, трансформации и разрушения гребней волн;

Эмпирика (поисковые изыскания): повсеместный контроль вычислений для динамической адаптации числовых объектов и процессов в системе критериев практической гидромеханики, с вовлечением результатов из опытовых экспериментов, эмпирических и асимптотических зависимостей.

В логической матрице отмечаются следующие алгоритмы:

Строка 1 п.2. Генерация на свободных границах расчетной области групповой структуры пакетов волн в произведении с огибающими ромбическими секторами, смещающимися с групповой скоростью;

Строка 2. Инерционное смещение корпуса по приращениям скорости – моделирование качки (без вовлечения в прямые расчеты присоединенных масс);

Строка 3. Генерация корабельной волны при отражении фронтов коротких фазовых волн и собственно корабельное волнообразование из точечных излучателей в каждой элементарной площадке обшивки.

Означенные разработки востребуют практическую адаптацию множества ресурсоемких алгоритмов, по большей части посвященных визуализации с использованием графики Window::Place [2010]:

- интерактивная программная среда для подготовки, проведения, визуализации и динамического управления вычислительным экспериментом;

- независимая графическая визуализация по таймеру или с приостановкой вычислительных циклов для внешнего управляемого перестроения алгоритмов;

- обработка прерываний в особых условиях: сбор аналитической информации по критическим узлам; настройка и управление визуализацией;

контроль и перенастройка математических моделей под локальные условия моделирования.

В заключение: на строках обобщенной логической матрицы синтезированы геометрические объекты и физические явления в качестве независимых «существительных» или структур данных со связанными с ними алгоритмами – методами быстрого доступа к данным. По столбцам формализуются «глаголы» – как операции гидромеханики, действие которых существенно зависит от особенностей динамики корабля, морского волнения и их взаимодействия. В крайнем столбце концентрируются результаты моделирования для детального и внятного представления мореходных качеств корабля в особых географических и навигационных условиях эксплуатации, покрываемых условиями эксперимента.

К вопросу о действии внешних сил, реакций корпуса и связанных моментов

В динамике твёрдого тела движения и повороты осуществляются относительно строго фиксированного центра тяжести. Однако, в движение корабля вовлекаются огромные присоединенные массы окружающей воды, которые в поперечном инерционном отклике соизмеримые или превышающие водоизмещение корабля, отчего фактически действующий динамический центр движения корпуса корабля значительно сдвигается в сторону центра гидродинамических давлений воды, который в отношении поперечных колебаний и рыскания формально ассоциируется с понятием центра бокового сопротивления.

Величина присоединённых масс упрощенно может оцениваться по соизмерениям эквивалентного эллипсоида, или с помощью интегрирования вихресточников в их мгновенном состоянии для поступательных смещений корпуса в условиях интенсивного волнения. Если в вычисли-

тельном эксперименте не рассматриваются скоростные потоки жидкости вблизи корабельной обшивки, то в начальном приближении можно воспользоваться простым удвоением массы корпуса для ускорений в поперечных направлениях, также как и при моделировании рыскания на курсе.

Величиной присоединенных масс для продольных смещений можно пренебрегать. В движении корабля также требуется учёт перераспределения давлений с учётом безотрывного стока потока с плавникового крыла ахтерштевня, для чего приближенно гидродинамический центр смещается в нос в положение одной трети длину корпуса, и что сказывается на условиях маневрирования тем сильнее, чем больше скорость хода корабля.

Корабль в штормовом море, как водоизмещающий объект, увлекается волновыми потоками по чисто кинематическим правилам: «как волна». При этом его условное собственное движение как твёрдого тела, и накопление кинетической энергии свободного движения существенно не зависят от колебаний в волновом потоке. В то же время на борту корабля проявляются значительные ускорения в темпе колебаний корпуса в волновом потоке, которые во вне отмечаются сильными кренящими моментами ввиду разницы аппликат центров водоизмещающих объёмов, близких к центрам бокового сопротивления движению, и центра сосредоточения масс надводного корабля, всегда удерживаемого значительно выше, ближе к аппликате метацентра для поддержания плавности бортовой качки.

Варианты моделирования:

1 – скользящая динамика хода (кинематика по поверхности) с фиксированной ориентацией корпуса относительно волновых склонов, и с вычислениями ускорений поступательных движений по волновым склонам в градиентах четырех треугольников крестообразного шаблона. Здесь не происходит изменения посадки корпуса относительно уровня воды. Учёт

присоединённых масс в поперечных ускорениях выполняется простым удвоением масса корабля, (по аналогии вдвое снижается реакция по ускорениям в свободном рыскании на курсе).

$$\delta \vec{V} = g \cdot \left(\left\| \vec{\text{grad}} S(x, y) \right\| - \vec{z} \right) \cdot \delta t, \quad [\text{рад/с}]$$

где $S(x, y)$ – поверхность уровня воды с учетом морского волнения, с нормированным до единицы вектором направления; z – орт вертикали.

Модель по законам механики свободно и без трения скользит по волновым склонам штормового моря, иллюстрируя особенности силового воздействия ассиметричных прогрессивных трохoidalных волн. В моделировании движения участвует некоторая разгонная сила, тарированная для тихой воды по заданной скорости хода. На крутых склонах волн модель корабля может не «выгребать» по штормовому волнению, и тогда простым добавлением мощности – условной скорости хода на тихой воде, можно провести предопределение потребной или безопасной скорости хода. Управление ходом выполняется по командам с клавиатуры <8/2> для добавок по два узла вперёд/назад соответственно, и <0> – стоп машина для свободного движения корабля под волновыми воздействиями и по инерции.

Моделирование рыскания в данном варианте выполняется чисто кинематически, с использованием поверхностных скоростей волновых потоков в оконечностях корабля относительно контрольного плеча на двух третях от длины корпуса. Таким образом, в движение всегда вовлекается строго определённая угловая скорость поворотов корпуса относительно вертикальной оси. Так как скорость трохoidalных волновых потоков измеряется на поверхности воды, образуется отчасти завышенное рыскание на курсе. Удержание модели на заданном курсе выполняется с помощью «бортового авторулевого», управляющее действие которого ограни-

чивается условно малыми перекладками руля, и отчего корабль может быть захвачен крупными волнами, и произвольно поставлен либо в аварийное положение, либо выведен носом на волну. Для ускоренного возврата на курс, или для быстрого поворота корабля можно воспользоваться ручным управлением: $\langle 4/6 \rangle$ – руль на борт; $\langle 7/9 \rangle$ – полборта влево и вправо.

2 – гидродинамика корабля по архимедовым силам всплытия изменяющегося объема погруженного в воду корпуса в условиях интенсивного волнения представляется базовой и безусловно разрешимой моделью штормовой гидромеханики корабля. В явных выражениях здесь записываются только три закона движения с гравитационными восстанавливающими силами по вертикальной качке, и с двумя восстанавливающими моментами для качки бортовой и килевой.

Рыскание и горизонтальные поступательные смещения корпуса рассчитываются в базовой модели можно учитывать по осредненному скоростному потоку в той же погруженной в воду части корпуса, что подобно живым водоплавающим будет увлекать корабль в синхронные смещения внутри волновых потоков, с минимальными возмущениями окружающей жидкости. Единственно, здесь будет востребоваться корректный учет разности аппликат центра тяжести и центра бокового сопротивления корпуса, относительно которых при ускоренных поступательных смещениях будут создаваться дополнительные кренящие и дифференцирующие моменты.

Воздействие усреднённых потоков и угловых скоростей необходимо дополнять параллельными вычислениями с помощью векторных интегралов по поверхности смоченной корабельной обшивки, что исключит ослабление внешних силовых воздействий в сильно заострённых оконечностях. (...к настоящему времени корректность «захватывающих потоков» отчасти подтверждалась только для совместного задействования объёмных и поверхностных интегралов [3D-тензорная математика]).

Использование захватывающих корабль усредненных потоков актуально для экспериментов с использованием чисто гидростатических внешних воздействий (варианты 1 и 2). В случаях вычислительных моделей с задействованием вихресточников для моделирования скользящих и отражаемых на элементарных фрагментах судовой обшивки скоростей течений, расчёты усредняющих потоков становятся неактуальными, но полезны для проверки существования такого захвата корпуса в движении среди крупных гребней штормовых волн.

В ближайших планах желательно проведение сверки весьма сложного алгоритма по косой ватерлинии с результатами на основе усредняющих интегралов для захватывающих потоков и циркуляций воды вокруг корпуса корабля.

Вместо вовлечения захватывающих потоков, для моделирования упускаемых в объёмных интегралах негармонических горизонтальных смещений и рыскания на курсе, действующий в программе «Аuroга» вычислительный эксперимент просто корректируется направлением действия архимедовых сил всплытия по нормали к условной плоскости для всеё поверхности действующей ватерлинии; и дополняется воздействием на динамику корабля асимметрии уровней воды на противоположных бортах (сторонах) относительно мгновенно действующей ватерлинии. При этом в алгоритмах задействуются вычисления распределённых сил от давления воды без необходимости привязки к гидростатическим центрам на малых площадках бортовой обшивки, что несколько упрощает и заметно ускоряет вычисления.

3 – гидродинамика корабля под воздействием переменных гидростатических давлений по поверхности смоченной обшивки корпуса. Такой эксперимент необходим для проверки точности вычислений в сравнении объёмными архимедовыми интегралами по вытесняемому кораблём объёмами жидкости. В цифровой модели корпуса расчётные размеры поверх-

ностных треугольников по площади никак не ограничиваются, и потому точный учёт аппликат центров гидростатических давлений, как центров приложения распределенных сил, становятся крайне необходимыми. Формально усреднённый наклон действующей ватерлинии с перепадами уровней воды на противоположных бортах теперь моделируются автоматически, без инородных гипотетических алгоритмов.

Однако, если на поверхности корпуса никак не рассматривается влияние скоростных потоков воды, то становится актуальным ранее упоминаемое интегрирование усредненных захватывающих корабль потоков, тех же, что в варианте – 1 с механикой на основе изменчивой архимедовой плавучести.

Сопоставление гидростатических и гидродинамических результатов показывает весьма точное совпадение, при условии, конечно, что на судовой обшивке нет перехлёстов с наложением совпадающих фрагментов.

4 – вариант с вычислениями по встречному набегающему потоку по ходу корабля. В данном случае вычислительный эксперимент дополняется моделированием скользящих и отраженных потоков на элементарных фрагментах бортовой обшивки, при этом не учитываются гидродинамические компоненты внешних сил штормовой природы. В данном варианте в точности выполняется условие стационарности потоков вблизи смоченной обшивки корабля, что позволяет размещать на ней вихреисточники для моделирования как для скользящих потоков с поправками для давления по закону Бернулли¹⁶, так и для отражаемых частиц жидкости с импульсами давления по формуле Торричелли¹⁷.

¹⁶ Закон Бернулли связывает стационарную скорость вдоль линии тока с локальным давлением в жидкости: $\rho V^2/2 + \rho \cdot g \cdot h + p = const$. Применяются к скользящим компонентам скорости в потоке вблизи бортовой обшивки. Даниил Бернулли, 1700–1782, швейцарский физик, механик и математик, член Петербургской академии наук (1733).

¹⁷ Формула Торричелли $v = \sqrt{2g \cdot h}$ применяется к нормальным компонентам скорости для корректировки давления при моделировании условий непротекания. Эвандже-

Это необходимо для моделирования проявлений ходового дифферента на больших скоростях хода, что в свою очередь важно для оценок посадки и остойчивости корабля в глиссирующих режимах ходкости, или для оптимизации корпуса по условиям минимизации ходового дифферента, что актуально для кораблей многокорпусных и обладающих малой площадью конструктивной или действующей на ходу корабля ватерлинии.

Формально точно такой же результат получается в условиях обнуления внешнего морского волнения. Но всё же, такой вычислительный эксперимент необходим для проверки избитого тезиса о том, что верхняя оценка опасности штормового плавания получается именно в случае гидростатической постановки корпуса корабля на волну. К настоящему времени специальной отработки этого предположения не проводилось, а попутно проводимые вычислительные эксперименты явно не свидетельствовали об усилении качки или повышенной опасности опрокидывания корабля в условиях чисто гидростатической постановки на волне.

5 – полный вычислительный эксперимент с моделированием силовых воздействий со стороны штормовых волн. Отличие от варианта с только со встречными ходовыми потоками состоит лишь в том, что вихреисточники на бортовой обшивке дополнительно компенсируют потоки жидкости под трохоидальными гребнями и склонами штормовых волн. Уместно обратить внимание, что в случае увлечения корабля в движение в увязке с потоками жидкости в трохоидальных кинематических пространствах штормовых волн, то пронизывающий сквозь корпус поток воды будет минимизирован, и тогда для остаточных волновых воздействий скорости течений могут признаваться относительно слабыми или почти стационарными.

ліста Торрічеллі (Evangelista Torricelli; 1608–1647, Флоренція) – італійський математик і фізик, ученик Галілея.

Центр давлений учитывает движение вытесненной корпусом воды вместе с присоединенным потоком окружающей жидкости, условно стационарно действующей на корабль в целом посредством распределённых сил от давления на бортовую обшивку в конкретный момент времени.

Гидродинамической особенностью модели можно называть усиленную асимметрию давлений в носовой и кормовой оконечностях, приводящую к значительному смещению центра давления вдоль корпуса в носовую часть корабля. При этом, продольные компоненты распределённых сил давления воды от встречного стационарного потока воды полностью взаимокompенсируются, и повышенное давление в носовой части корпуса выравнивается его понижением в кормовых сходящихся ватерлиниях, строго и точно в соответствии с парадоксом Д'Аламбера¹⁸ для идеальной жидкости.

Тогда получается, что в идеальной жидкости смещение центра давления навстречу набегающему потоку максимально, и внесение вязкостных поправок лишь отчасти ослабляет потоковый сдвиг центра силового давления воды. Здесь также уместно обратить внимание, что удлинённый корпус корабля с заострённым плавниковым ахтерштевнем под кормовым подзором приводит гидродинамику корабля к хорошо изученным процессам на крыле. В данном случае, возникновение эффекта крыла при косых потоках на корпусе корабля ослабляет смещение центра давления в сторону носовой оконечности, и если углы атаки набегающего потока не отмечаются срывами на задней кромке кормовых рулей корабля, то и центр действия присоединённых масс не сдвигается более двух третей ($2/3$) от гидродинамически активной длины корпуса корабля.

¹⁸ Парадокс Д'Аламбера – Эйлера свидетельствует об отсутствии каких-либо внешних сил при стационарном обтекании идеальной жидкостью твёрдого тела произвольной формы. Д'Аламбер, Жан Лерон (*Jean Le Rond D'Alembert, d'Alembert*) 1717–1783 – французский учёный энциклопедист, член Петербургской академии наук (1764).

В расчетах локальных координат центра давления участвует гидростатическое давление $g \cdot h$ [м²/с²], в сумме с относительно малыми скоростными добавками по вихревому слою подтормаживания скользящих течений по Бернулли $V_\tau^2/2$; и асимметричным распределением источников $n \cdot V_n^2/2$, где n – знак источника (+) и стока (–), для моделирования непротекания бортовой обшивки по обращенной формуле Торричелли:

$$C_p^{\leftarrow} = \frac{\iint_S p_s \cdot r \cdot \delta s^{\leftarrow}}{\rho \cdot g \cdot \iint_S h \cdot \delta s} = \frac{\iint_S (h + \frac{V_\tau^2 \pm n \cdot V_n^2}{2g}) \cdot r \cdot \delta s^{\leftarrow}}{W} =$$

$$= \frac{\iiint_W r_w dw^{\leftarrow}}{W} + \frac{\iint_S (V_\tau^2 \pm n \cdot V_n^2) \cdot r \cdot \delta s^{\leftarrow}}{2g \cdot W} \quad [M]$$

В последнем выражении показывается, что гидростатическую часть можно вычислять по объёму корпуса (по Архимеду), с гидродинамической добавкой по Бернулли-Торричелли только по необходимости, в случаях присутствия встречного ходового потока и быстрых течений под гребнями и склонами интенсивных трохоидальных волн.

Получается вполне естественный алгоритм вычисления центра величины с поправками в качестве центра сопротивления внешним воздействиям от скоростей потока вблизи бортовой обшивки. W [м³] – здесь приводится объёмное водоизмещение, так как во всех расчётных алгоритмах не задействуется величина плотности воды, что допустимо для вычислений в гидродинамике идеальной жидкости. В расчётах водоизмещения не участвует поверхность действующей ватерлинии, где по определению отсутствует гидростатическое давление воды, и потому целесообразно исключить из расчётов центра давлений и скоростные потоки на поверхности действующей ватерлинии, что видимо не особо противоречит здравому смыслу в отношении укрытой внутрикорпусной и «виртуальной» поверхности.

6. По умолчанию в эксперимент включается чисто кинематический эффект захвата корпуса потоками воды в толще трохoidalных волн. Внутри корпуса возникают ускорения под гребнями штормовых волн, и сильные реакции на плече от центра масс к центру внешних гидродинамических сил. Динамический тензор присоединенных масс как реакция окружающей воды учтены корректирующими коэффициентами, близкими к единице для поперечных движений корпуса и рыскания, с ослаблением для продольных смещений, вертикальной, бортовой и килевой качки, где существенны гидростатические восстанавливающие моменты.

Эксперимент позволяет отработать обводы средней части корпуса из условия взаимокompенсации кренящих моментов от штормовых волн в сопоставлении с кинематикой волновых потоков. Интенсивность бортовой качки, даже при высоко разнесённых по аппликате центрах масс и гидродинамического сопротивления, может быть многократно минимизирована.

В моделирование морского волнения также предусматривается выбор вариантов, в том числе позволяющих оценивать условия штормового маневрирования корабля на мелкой и глубокой воде:

1) с использованием равномерной прямоугольной сетки, и регуляризованной сетки с переменным шагом [«Волна», 2013], динамически адаптируемым под крутизну и скорости течений в гребнях волн;

2) морское волнение представляется либо в полных потоках со скоростями течений не зависящими от глубины, либо трохoidalными волнами [Computational model... 2020] с экспоненциальным затуханием скоростей течений с глубиной;

3) вариант моделирования морского волнения без искажения поверхности при взаимодействии с корпусом корабля, или полная разностная модель с моделированием трансформации волн после отражения от корпуса корабля.

В последнем наиболее ресурсоёмком варианте моделирования морского волнения контур действующей ватерлинии выстраивается как с учётом взаимной интерференции волн, так и с учётом её мгновенной трансформации у борта корабля. Однако, именно для этого эксперимента актуальны вопросы корректности быстрых смещений корпуса с ударными гидродинамическими нагрузками, разрешение которых в будущем потребует многократного увеличения вычислительных ресурсов, и, к сожалению, без особо существенного влияния на результаты моделирования.

Алгоритмы и структуры данных в построении цифровой модели корпуса корабля

Цифровая модель корпуса корабля в качестве единого числового объекта изначально образуется таблицей плазовых ординат, дополняемой абсциссами штевней и ординатами их транцевых расширений, как это определено в построении базы данных теоретических чертежей Санкт-Петербургского университета [БД-«Vessel», 2015], в качестве особой C++структуры: Hull. формируется в оперативной памяти вычислительного эксперимента [«Hull», 2010] –Пространственная геометрия корпуса корабля и окружающих водных потоков формируются с использованием алгоритмов тензорной математики: интерфейс Base [«Тензор», 2013] для строго и однозначного связывания локальных внутрикорабельных координатных базисов с внешней или глобальной морской системой отсчёта маневрирующего корабля.

Независимая надстройка для динамической визуализации моделируемых процессов использует однородные координаты в графическом окружении Window:Place [«Контекстная графика», 2010] – обеспечивающем интерактивное управление вычислительным экспериментом, с

независимой от хода вычислений визуализацией в трехмерной графической среде программирования на основе OpenGL.

Для совместимости с иными операционными системами, как Linux\Unix; Andoid, OS-MESA и др., с состав среды программирования добавлена возможность замены прямого обращения к msWindows-WGL на GLFW-OpenGL. Переносимость текстовых шрифтов обеспечивается полностью автономным набором растров на Русском и Английском языках, а также комплект векторных шрифтов со сдвоенными начертаниями контуров букв на Русском, Английском, Греческом и Иврите, с полным набором графических символов из старых OEM и ANSI кодировок.

Геометрия обводов и алгоритмы представления корпуса корабля

Числовое описание модели корабля в текстовом файле с расширением *.vsl начинается с признака файла «▲»(x30) и расширенного названия проекта корабля в угловых скобках (<имя и тип корабля...>) в первой активной строке (Рис. 2). Затем приводятся указания общего количества – Nframes, и номера мидельшпангоута – Mid.

Относительно абсциссы указанного мидельшпангоута в вычислительном эксперименте контролируется движение с прорисовкой маршрута корабля при моделировании штормового маневрирования.

В третьей строке задаются значимые для расчётов размерения корабля: конструктивные **L** – длина, **B** – ширина, **T** – осадка, и необязательная величина ΔT – для дополнительного погружения корпуса.

Относительно компактный код программы для вычислительного эксперимента получается с использованием компилятора MinGW-C++ версии TDM-GCC-4.3.3 от 16 февраля 2009 года. По крайней мере такой компилятор вдвое сокращает объем исполняемого кода программы, но, к сожалению, в столь великовозрастной версии компилятора ещё не под-

держивались обозначения переменных русскими буквами, и потому в программном комплексе в целом приняты следующие обозначения в латинских начертаниях:

`class Hull` – определение структур данных и операций по корпусу корабля с виртуальными смещениями в пространстве и быстрой выборкой элементарных треугольников бортовой обшивки:

`Matrix` – ортогональный и ортонормированный корабельный базис для быстрых преобразований координат из корабельного в морской базис, и обратно;

`View` – сцена графического окна с фоновым управлением пространственными перспективами в однородных координатах OpenGL.

Константы:

`Real Length Breadth Draught` и ΔT – расчётные длина, ширина и осадка корпуса корабля;

`Int Nframes` и `Mid` – общее количество и номер мидельшпангоута.

Скаляры { i }:

`Course`, `dCs` – действующий на текущий момент курс корабля и заданный по курсовому углу на удержание авторулевому;

`Speed`, `cSp` – действующая на текущий момент и устанавливаемая по условной мощности двигателя скорость хода корабля по тихой воде;

`iV~Volume` – текущий погруженный объём и исходное объёмное водоизмещение;

`iF~Floatage` – площадь ватерлинии действующая и на тихой воде;

`iS~Surface` – площадь изменчивой смоченной поверхности корпуса, и изначальная площадь погруженной поверхности обшивки;

Trim – дифферент задаётся начальным смещением центра величины для удифферентованного до нужной величины корпуса;

h_x – фиксируемая метацентрическая высота для начальной остойчивости;

K_v – доля сброса отрицательного давления по нормали стока потока (Даламбер).

Векторы { v }:

Gravity – центр тяжести в локальных корабельных координатах;

$v_B \sim Buoyancy$ – координаты центра величины, центра плавучести корпуса;

$v_F \sim Floatable$ – центр площади текущей и начальной ватерлинии;

$v_M \sim Metacenter$ – текущая и заданная аппликата поперечного метацентра;

Locate – местоположение корабля во внешней морской системе координат;

Тензоры { m }:

$m_W \sim inWater$ – моменты инерции площади действующей ватерлинии I [m^4]

$m_M \sim inMass$ – тензор массовых (пространственных) моментов инерции M [m^4] корпуса по качке и рысканию корабля.

Маршрутные записи { $flex$ }:

Route – траектория хода корабля в морской системе отсчёта [м]

Rate – вектор скорости движения корпуса в корабельном базисе [м/с]

Head – ориентация во внешнем пространстве в углах Крылова [рад]

Whirl – скорости вращения относительно корабельных осей [рад/с]

Mix – сохраняемые величины повторных перерасчетов в протоколах:

Mix.z – уровень моря на миделе; y – курс; x – скорость хода ...

На каждом шаге вычислительного эксперимента заново вычисляются геометрические характеристики и гидродинамические параметры движе-

ния корабля на интенсивном волнении, с явным учётом кинематики корпуса относительно взволнованной поверхности моря (*отмеченные выше двухсимвольными переменными*), при этом, в начальный момент времени вычислительного эксперимента, на первом расчётном цикле волновое поле не создается, и все начальные числовые величины переприсваиваются исходным числовым объектам (*отмечены словами*) для фиксации массовых, инерционных и всех гидростатических параметров корабля на тихой воде без качки.

Вычислительный эксперимент всегда начинается с нулевой скорости хода на чистой воде. Цифровая модель корабля плавно набирает требуемый ход и постепенно включается в процессы качки, рыскания и пульсаций скорости хода по мере усиления морского волнения. Для корректной оценки средней скорости хода на волнении, в эксперимента ожидается первой падение хода, которое назначается в качестве минимальной и осреднённой ходкости на волнении на данный момент времени.

Основные элементы числовой структуры для определения геометрии корабельных обводов с элементами общекорабельной архитектуры

Основные имена числовых структур и связанных с ними операций:

$Stern[*]$, $Frame[Nframes+2][*]$ и $Stem[*]$ – пространственные контуры ахтерштевня, шпангоутов и форштевня;

$Keel[Nframes+2]$ – местоположение шпангоутов на килевой дорожке.

$Shell[Nframes+1][*]$ – индексные последовательности для построения треугольников в пределах шпаций и оконечностей.

Отсчёты индексов относительно килевой дорожки: 0 – ахтерштевень; $Frame[1...Nframes]$ – шпангоуты по проекции корпус теоретического чертежа; $Nframes+1$ – форштевень. При считывании контуры $Stern$ и

Stem дополняют шпангоуты, но они сохраняются для замыкания транцевых расширений и утолщений на штевнях.

Основная часть корпуса описывается с помощью параметрического описания шпангоутов $Frame(z, y)$, зафиксированных по таблице ординат на абсциссах основной линии $Keel(x)$; и штевней корпуса корабля $Stem(x, y, z)$ и $Stern(x, y, z)$, синтезирующих раздельное считывание ординат и абсцисс в контурные пространственные координаты $\{x, y, z\}$.

Контурные шпангоутов могут определяться неоднозначными функциями, например, для формирования тоннельной кормы или построения многокорпусной архитектуры судна. Крайние точки шпангоутов с нулевой ординатой могут опускаться, они всегда автоматически дополняются последней первой и аппликатой при считывании корпуса. Ввиду того, что в проекции бок контуры диаметральной плоскости с транцевыми расширениями не всегда ограничиваются штевнями, то нулевые ординаты транцевых расширений и абсциссы контуров оконечностей желательно указывать в явном виде, иногда здесь делаются повторы одинаковых ординат для увеличения количество интерполирующих точек на штевнях.

На штевнях указываются утолщения в оконечностях или транцевые расширения, и по необходимости дублируется ширина плоскостей на днище или палубах:

$y = 0$ – заостренный штевень или слом по линии килея на днище;

$y > 0$ – ордината ширина до слома ватерлинии на транце, ширстрелке или плоском киле.

$y < 0$ – закруглённое окончание на штевнях (*не отработано*).

При считывании двух строк с описанием штевня происходит последовательное сопоставление и взаимное интерполирование абсцисс контуров диаметральной плоскости с ординатами соответствующих транцевых расширений (*или радиусов бульбовых скруглений*).

Триангуляционное покрытие выстраивается с помощью матрицы ссылок: `Shell[Nframes+3][1+*]`, с индексами элементов числовых последовательностей при описания контуров шпангоутов и штевней корпуса. Количество точек для контуров хранится на месте нулевых индексов, перед последовательностями пространственных координат, задающих неоднозначные функции координат, позволяя работать с многокорпусниками и корректно прорисовывать бортовые кили или крупные элементы надводной архитектуры корабля.

Изначально в построении корпуса контуры штевней индексировались по особым правилам с динамическим поиском точек штевней внутри теоретических шпаций. В двух старших битах каждого отсчёта в индексном массиве хранятся признаки вершин треугольников:

```
LeftFrame 0x8000 // точки смежного левого (в корму) шпангоута  
SternPost 0x4000 // индексная маска шпаций близи ахтерштевня  
StemPost 0x2000 // и форштевня в шпангоутных треугольниках  
FramePost 0xE000 // общая маска особого шпангоутного индекса
```

Логика поисков точек на штевнях внутри расчетных шпаций, между теоретических шпангоутов, представляется вполне надёжным, но очень трудно подстраиваемым для случаев тоннельным обводов или многокорпусных моделей.

В последней версии программного комплекса «Aurora» реализована предварительная выборка точек на штевнях с их переносом внутрь расчетных шпаций, и с формированием дополнительных искривлённых контуров на штевнях в оконечностях корпуса.

В обновлённом варианте существенно упрощается логика динамического переформатирования штевней к шпангоутам при построении сетки из треугольников, а в уточнении типа шпангоута в пределах одной шпа-

ции остаётся только один бит для отметки левого смежного шпангоута – в сторону кормовой оконечности.

```
LeftFrame 0x8000 // левый смежный шпангоут в расчётной шпации
```

Для ускорения геометрических построений все разности абсцисс внутри шпаций на шпангоутных контурах устанавливаются одинаковыми, в том числе по точкам, снятым со штевней. В некоторых отладочных версиях программы иногда задействовались единичные интервалы между шпангоутами, однако, для корректного формирования выступающих частей и палубных надстроек в действующей версии программы используются исходные теоретические отсчёты для продольного местоположения шпангоутов.

Контурные штевней за пределами всех расчётных шпаций образуют два остаточных шпангоута в оконечностях: `Shell[0][1+*]` – кормовое окончание, как выступающая часть ахтерштевня, и по носовой оконечности – `Shell[Nframes+1][1+*]`. В качестве единой разности абсцисс устанавливается отстояние по максимально удалённым точкам на штевнях. Соответственно, индексация теоретических шпангоутов остаётся внутри интервала с индексацией по их количеству: `[1...Nframes]`.

В модуле **Hull** с расчётами по теории корабля, точки на шпангоутах последовательно соединяются либо отрезками прямых, либо, для повышения точности – гладкими сплайновыми параметрическими кривыми, где повторение точек с одинаковыми координатами служит признаком слома гладкой кривой (по аналогии с трёхмерной графикой электронного кульмана DesignCAD)

В вычислительном эксперименте **Aurora** поверхность корабельной обшивки формируется только из треугольников, что требуется для быстрых и точных вычислений гидростатических параметров корпуса, в том числе в случаях с треугольниками весьма больших размеров.

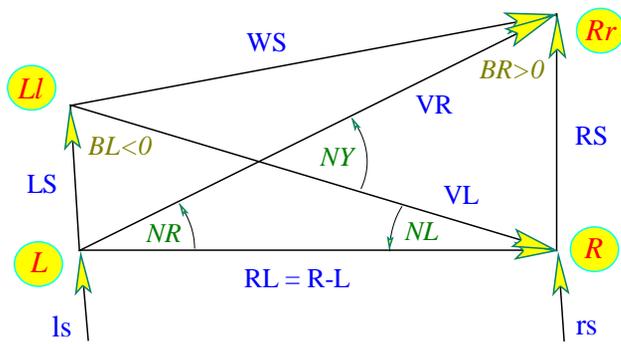


Рис. 34. Разметка оптимизируемых треугольников на обшивке корпуса.

Простейшим оптимизационным алгоритмом стал выбор минимальной длины диагоналей четырехугольника VR, VL , при этом особо отрабатываются совпадающие точки, сломы шпангоутов и большие разности углов нормалей в последовательностях смежных треугольников в полосе расчётной шпации.

Альтернативным алгоритмом реализован двухпроходный анализ двух смежных четырехугольников.

По подводной обшивке сначала от киля в сторону ватерлинии попутно выполняется поиск резких сломов, свойственных выступающим частям, как бортовые кили, крыльевые стабилизаторы или кормовые рули. При их обнаружении, формирование обшивки приостанавливается, с последующим построением треугольников по шпации в обратную сторону – от ватерлинии к точкам приостановки.

По надводной части задействуется весьма сложный алгоритм с поиском ограничивающих засечек по сломам на шпангоутах, в частности на палубном ширстреке, а также по дублирующимся точками, как по извне установленным точкам обязательных сломов борта. Суть построений в использовании приостановки формирования поверхности на точках слома борта, формально оптимизированных допустимых углам на поверхности корпуса по конкретной подборке корпусов в рабочей базе данных цифровых теоретических чертежей: «**Vessel**».

Ускоренная обработка элементарных фрагментов судовой обшивки выполняется с помощью особо оптимизированного двумерного массива индексов $Shell[y][z]$, регуляризованных для последовательной выборки поверхностных треугольников с предустановленной ориентацией векторного произведения в направлении внешней нормали. Выборка треугольников выполняется с помощью процедуры $Select(y,z)$.

Так, в частности:

а) – абсциссы штевней и шпангоутов локализуются от нуля до средней величины шпации;

б) – все разности ординат для точек на смежных шпангоутах уменьшаются в три раза;

1 к ранее отмеченным нулевым разностям на сломах шпангоутов добавляется целый четырехугольник с оптимизированной парой треугольников;

2 к новой нулевой разности добавляется смежный треугольник, а в случае двух сломов выполняется поиск другой ненулевой пары разностей;

3 проверяется наклон диагоналей, который не должен превышать 20° ;

4 выявляются сломы шпангоутов на $8^\circ 30'$ и либо добавляется смежный треугольник, либо по двум сломам достраивается четырехугольник;

5) сравниваются нормали новых треугольников с последним из ранее установленных в цикле оптимизации выбора.

Виртуальная процедура $Draw$ подготавливает графическую среду для изображения корпуса с предварительной настройкой графической сцены, где контекстно независимая процедура $Drawing$ – выполняет прямую прорисовку корпуса без какого-либо масштабирования – «как есть».

Режим изображения задаются горячей клавишей «**Tab**» и управляется маской $DrawMode$ с последовательным переключением:

0 – прозрачный корпус с проявлением гидростатических центров;

1 – поверхность ватерлинии с контурами штевней и шпангоутов;

- 2 – к действующей ватерлинии добавляются подводные обводы;
- 3 – корпус изображается целиком, но без штевней и шпангоутов.

Переключение «Space» (пробел) заменяет закраску рёбрами элементарных треугольников:

0x4 – те же режимы 0÷3, но только с триангуляционными ребрами

Динамика корабля моделируется при вызове процедуры Floating – свободное плавание на взволнованной поверхности моря; и процедуры Moving – смещение корпуса корабля под действием внешних сил за тот же расчётный интервал времени ΔT .

Признаком необходимости вычисления и фиксации расчётных значений на тихой воде в качестве исходных величин является отсутствие исходного водоизмещения ($Volume = 0.0$ и/или счётчик расчётных циклов во времени $Kt = 0 \rightarrow$ обновление).

Для разделения элементов обшивки – треугольников на прилегающие к штевням, правому или левому борту (Board), и обозначения принадлежности к подводным обводам, к поверхности на воде (ватерлинии) и, к надводным ветвям шпангоутов и палубе (Level):

`int Board, // '0' штевни; '-' левый или '+' правый борт`

`Level; // -2 – подводные обводы; -1 – смоченный борт выше теоретической ватерлинии; 0 – поверхность действующей ватерлинии; +1 – осушенный борт ниже теоретической осадки; +2 – надводный борт выше ватерлинии.`

Размерности корпуса определяются в естественном масштабе, все геометрические величины, площади, объёмы и моменты инерции исчисляются в локальной/корабельной системе координат, с нулевой точкой отсчёта на мидельшпангоуте на уровне ватерлинии по заданной осадке.

Настройки графической сцены визуализации вычислительного эксперимента

Параметры визуализации, в случае независимого представления корпуса корабля в виртуальной процедуре Draw, определяются в предварительно инициированном контексте графической среды программирования OpenGL.

`eye, look` – угловые отсчёты для направлений из точки обзора на местоположение сцены;

`Distance` – расстояние от точки наблюдения до центра сцены в масштабных величинах вычислительного эксперимента, в метрах.

Установки для отображения графических сцен осуществляются либо с помощью специально оговоренных аккордов клавиатуры, или с помощью указателя «мышь».

Изначально графическое изображение корпуса корабля использовалось для непрерывного контроля процессов динамики и взаимодействия корабля с крупным трохoidalным морским волнением. Ключ `onlyDraw=true` – служит для запуска режима изображения корабля в графическом потоке контекстно-зависимой среды OpenGL без влияния на данные по кораблю и состоянию моря. Иначе, эта же процедура `floating(false)` реентерабельно исполняется в параллельном потоке для моделирования корабельной гидромеханики без каких-либо обращений к устройствам отображения информации.

С каждым расчётным шагом заново формируется поверхность действующей ватерлинии. На поверхности корпуса могут отображаться векторы потоков, которые с каждым расчетным шагом перестраивается вместе со штормовым контуром действующей ватерлинии.

Вычислительный эксперимент строится с разделением решений по независимым физическим процессам, что полагает возможным интерактивное управление параметрами морского волнения и характером силового взаимодействия корпуса корабля со штормовой стихией. Управление курсом и ходом модели корабля в условиях интенсивного волнения осуществляется в дифференциальных экстраполяциях с получением плавной кинематики корпуса под управлением динамически подобных тяговых движителей и кормовых рулей.

В моделируемом движении цифровая модель корабля отдельно взаимодействует с каждой из базовых волновых структур, что гидродинамически корректно воспроизводит главную часть процесса отражения трохoidalных волн от корпуса корабля. Результирующее волновое поле и пространственное распределение скоростей подводных течений получается векторным суммированием (простой суперпозицией¹⁹) независимых трохoidalных процессов, и служит для вычисления гидродинамических сил и реакций общего воздействия гребней штормовых волн, в целом, определяя штормовую гидромеханику корабля на ходу произвольными курсами относительно волновых фронтов.

Ускорению вычислений служат упорядоченные по шпациям числовые структуры для описания поверхности судовой обшивки, что также даёт возможность включения реентерабельных алгоритмов для распараллеливания всего процесса вычислений. На каждом шаге эксперимента заново интерполируются точки пересечения волновых склонов и ставятся бимсы для динамического построения поверхности ватерлинии с разделением подводного и надводного объёмов корпуса. По обводам корпуса вы-

¹⁹ В простой суперпозиции не контролируется возможное обрушение гребня суммарной волны, что формально приведет к усиленному силовому воздействию на корпус корабля, или – к оценкам результатов в «опасную сторону».

числяются новые объёмы со смещёнными центрами величины (моментами инерции), с использованием градиентов наклона волновой поверхности усредняется интегральное направление действия архимедовых сил всплытия.

Метацентрические характеристики корпуса вычисляются, но используются только для визуального контроля динамики корабля в традиционных представлениях теории корабля, для чего дополнительно вычисляются площадь, положение центра и моменты инерции площади действующей ватерлинии, метацентрические радиусы и положение метацентров по вертикали от изменчивого центра величины погруженной части корпуса.

Список принятых обозначений в штормовой гидромеханике корабля

$Volume [M^3]$ и $Surface [M^2]$ – водоизмещение и площадь смоченной обшивки корпуса на тихой воде; $iV [M^3]$ – погруженный объём корпуса в условиях качки на волнении; $\vec{Gravity}$ – вектор координат фиксированного центра тяжести корабля в глобальной морской системе отсчёта; $\vec{Buoyancy}$ и $vB^\circ [M]$ – центр величины – вектор в корабельных координатах к местоположению центра погруженного объёма корпуса на тихой воде и волнении; $\gamma \vec{B} = g \cdot \rho \cdot \vec{B} [кг \cdot м / с^2]$ – вектор архимедовых сил всплытия; $\vec{Floatable}$ и $vF^\circ [M]$ – центр площади ватерлинии на тихой воде и волнении; $vW [\delta]$ – вектор нормали к склону волны; $vS^\circ [H/\rho]$ и $vR^\circ [H \cdot м / \rho]$ – и векторы сил и моментов по площадкам судовой обшивки, с учётом давления под вертикалью волнового склона со спадом на величину касательной скорости по Бернулли:

$$\delta h_z = 0.5 \cdot (\delta V)^2 / g^\circ [M].$$

$\vec{G} \{ \xi, \eta, \zeta \}$ (x-surge, y-sway, z-heavy) $[M]$ – координаты центра тяжести в подвижных корабельных координатах;

$\vec{\Omega} \{ \theta, \psi, \nu \}$ (x-roll, y-pitch, z-yaw) [°] – направление курса – поворотов по осям крена, дифферента и рыскания;
 \vec{V} [м/с] – вектор скоростей поступательных и $\vec{\omega}$ [°/с] – скоростей угловых колебаний;
 \times
 \mathbf{r} [δ³] – корабельный базис, как безразмерный и нормализованный тензор чистого поворота;
 \times
 $\rho \cdot \mathbf{inMass}$ [кг·м²] – массовый (объёмный [м⁵]) тензор инерции корабля;
 \vec{L} [м] – плечо расхождения центров величины и тяжести; \vec{iV} – вектор нормали к склону волны; h – поперечная метацентрическая высота.

Математические объекты и операции пространственной гидромеханики в корабельном и внешнем координатных базисах

Преимущественно применяются обозначения строчными буквами для объектов в подвижной локальной – корабельной системе отсчёта, либо заглавными – для величин в неподвижной глобальной – морской системе координат. Векторные величины измеряются в локальном корабельном базисе с отметкой стрелочкой влево: \overleftarrow{a} , либо в глобальной неподвижной морской системе координат \overrightarrow{A} со стрелочкой вправо, где отмеряются склоны и гребни морских волн и происходит их графическая визуализация совместно с кораблём в штормовом море. Проекции свободных векторов соотносятся операциями произведения с ортогональным, ортонормированным тензором корабельного базиса (или – тензором ориентации) $\times \wedge \vee^T$:

$\rightarrow \times \leftarrow$
 $A = \mathbf{r} \cdot \overleftarrow{a}$ – из корабельного базиса в морскую систему отсчёта;
 $\leftarrow \rightarrow / \times$
 $\overleftarrow{a} = \overrightarrow{A} / \mathbf{r}$ – возврат свободного пространственного вектора к ориентации относительно локального корабельного базиса, что справедливо как

для векторов местоположения и скоростей перемещения, так и для угловых векторов и скоростей вращения.

Соответственно полный пересчёт связанных с местоположением R векторов в корабельной и глобальной системах координат²⁰:

$$\vec{A} = \vec{R} + \mathbf{r} \cdot \mathbf{a}$$

– переход из корабельной в неподвижную глобальную морскую систему координат;

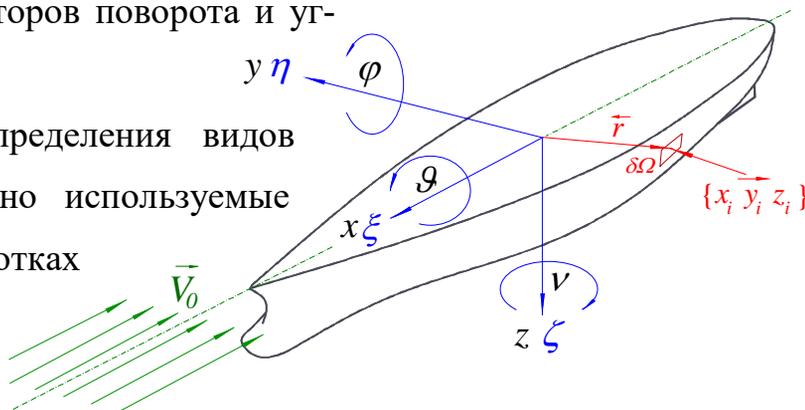
морскую систему координат;

$$\mathbf{a} = (\mathbf{R} - \mathbf{A}) / \mathbf{r}$$

– возврат к отсчётам относительно подвижного корабельного базиса.

Аналогичные операции по смене локальных базисов без смещений справедливы в случаях преобразования координатных компонент для пространственных векторов поворота и угловых скоростей.

Традиционные определения видов качки корабля, активно используемые теоретических проработках вычислительного эксперимента:



1 – бортовая (roll)– (x, крен на +правый и –левый борт, θ – ϑ)

2 – килевая (pitch)– (y, дифферент на +корму, на –нос, ψ – φ)

3 – рыскание (yaw)– (z, уход с курса +вправо, –влево, χ – φ)

4 – продольно-горизонтальная (surge)– (x, +разгон и –потеря, ξ – ξ)

5 – поперечно-горизонтальная (sway)– (y, +вправо и –влево, η – η)

6 – вертикальная (heave)– (z, +погружение и –всплытие, ζ – ζ)

²⁰ Операции тензорной математики [16] из гидромеханики сплошных сред обладают наивысшей вычислительной эффективностью в пространственных перерасчётах.

Моделирование движения корабля в тяжелой воде на интенсивном трохoidalном волнении под влиянием вертикальных гравитационных напряжений, строится на принципах прямого (непосредственного) вычислительного эксперимента, где внешние силы и динамические реакции корпуса корабля обуславливаются (неписанными) законами нестационарной гидромеханики, действующими в условиях непрерывных эволюций распределенной энергии в вызванных потоках окружающей жидкости – присоединенных массах окружающей корабль воды.

Однако, практические решения задач нестационарной гидромеханики для корабля в реально вязкой, сжимаемой и кавитирующей жидкости, с предельно возбужденной энергией гравитационных напряжений под свободной поверхностью воды, пока остаются в области теоретических разработок [16 – Трехмерная тензорная математика, 2005] или крайне ресурсоемких – суперкомпьютерных вычислительных экспериментов.

Для доведения прямого вычислительного эксперимента в гидромеханике корабля до значимых в инженерном отношении результатов потребуются вовлечение неких эмпирических или эвристических постулатов, которые без качественных рассогласований приведут к приемлемым оценкам проектных кораблестроительных заключений, с последующими проработками корректных наставлений мореплавателям для эффективного и безопасного маневрирования в штормовом море под ураганными ветрами.

Предвосхищая комплексные математические и алгоритмические построения с использованием таких эвристических подходов в реализации прямых вычислительных экспериментов, можно сформулировать основные допущения в моделях чисто локальных взаимодействий подвижных частиц жидкости с элементарными площадками на судовой обшивке корпуса корабля:

1) принимая аксиому о стационарности видимых фаз и фронтов корабельного волнообразования с борта движущегося корабля, полагаем распределение интенсивности излучения и отражения морских волн зависящим лишь от геометрии обводов корпуса, тогда как видимая изменчивость профилей волн вблизи корпуса корабля объясняется лишь взаимной интерференцией;

2) по аналогии с методами вовлечения корабельных обводов в уравнениях Мичелла-Кочина для корабельного волнообразования, поверхность смоченной корабельной обшивки покрывается вихреисточниками, определяющими условия непротекания с подтормаживанием набегающих потоков в оконечностях корабля, что моделируется простыми разрывами нормальных v_n и касательных v_s скоростей на поверхности бортовой обшивки:

$$\overleftarrow{v} = v_n + v_s = (\overleftarrow{n} \cdot \overleftarrow{v}) \cdot \overleftarrow{n} + [\overleftarrow{n} \times \overleftarrow{v}] \times \overleftarrow{n}, \quad [м/с]$$

где вектор $\overleftarrow{v} = -V - v_\omega = V + \omega \times L$ – скорость невозмущенного набегающего потока с учетом угловых скоростей в поворотах корпуса ω при L - отстоянии от динамического центра движущегося корабля.

3) ориентируясь на независимость влияния локальных скоростей относительно потоков на удалении от корпуса корабля (принцип относительности), из гидростатического давления p [Н/м²] исключается вектор скорости хода корабля V [м/с] в гидродинамических зависимостях по Бернулли.

$$p = \rho \cdot \frac{(\overleftarrow{v} + \omega \times L - \overleftarrow{V})^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h \quad [кг/м \cdot с^2]$$

где: $\rho = 1\,025$ [кг/м³] – плотность воды; V – скорость хода и v [м/с] – локальная скорость вблизи корпуса; h_z [м] – глубина; p_a [кг/м/с²] – атмосферное давление.

центром «бокового сопротивления», и её компонента гидродинамического сопротивления в проявлениях формы «крыла» может находиться за центром величины относительно центра тяжести, но в общем случае округлого корпуса можно выбирать подводную точку a строго посередине между мгновенными центрами величины и площади действующей ватерлинии:

$$\overleftarrow{a} = (\overleftarrow{c} \cdot v + \overleftarrow{f} \cdot s) / (v + s), \quad [M]$$

где c – вектор координат центра величины, и f – центра площади ватерлинии; v – мгновенные значения водоизмещения и s – площади действующей ватерлинии.

Местоположение динамического центра приложения результирующих сил и моментов для сдерживающей реакции корпуса уточняется с помощью коэффициентами демпфирования, учитывающих вязкое сопротивление воды совместно с действием присоединенных масс. При усилении демпфирования кинематический центр корабля w смещается к подводной точке, при ослаблении к центру тяжести:

$$\overleftarrow{w} = \frac{\overleftarrow{a} \cdot v \cdot m + \overleftarrow{G} \cdot V \cdot (1 - m)}{v \cdot m + V \cdot (1 - m)} \quad [M]$$

где v – текущая мгновенная величина водоизмещения; V – полное водоизмещение, дополняемое замерах при вертикальной качке корпуса; G – координаты центра тяжести корабля; $m \{ x, y, z \}$ – параметры демпфирования, нормированные к интервалу $[0,5 \div 1,0]$:

$$\overline{m} = (1 + \tanh \overline{\mu}) / 2$$

где $\mu \{ \xi, \eta, \zeta \} [0 \div \infty]$ – безразмерные коэффициенты демпфирования поступательных смещений корпуса.

Для примера, в приведенной зависимости при нулевом демпфировании динамический центр корпуса на конструктивной осадке встанет строго посередине подводного центра a и центра тяжести G , при сильном

демпфировании корабль будет раскачиваться относительно подводного центра – условного центра бокового сопротивления. Под действием вертикальной качки, в процессе регистрации увеличивающегося контрольного водоизмещения V , влияние центра тяжести будет немного ослабевать, подобно увеличивающемуся демпфированию корпуса, что отчасти уменьшит интенсивность качки и снизит опасность опрокидывания корабля. При полном погружении подводный центр корпуса вычисляется по вышеприведенным зависимостям, при отрыве от воды этот центр автоматически приводится к центру тяжести.

Проводя все вычисления исключительно с величинами в их физической размерности, по возможности, в алгоритмах используется ограничение крутизны прогрессивных волн не более 30° , и стоячих гребней девятых валов не круче 60° . Для этого применяется либо суммирование объемов воды под гребнями путем ограничения максимальной крутизны волнообразования, либо просто отсекаются избыточные потоки в условно обрушающихся гребнях новых волн.

Об интерактивном выборе вариантов построения вычислительных экспериментов

Числовая модель корабля строится в полномасштабных цифровых теоретических чертежах, с охватом надводной общекорабельной архитектуры, с соблюдением массовых и динамических характеристик корпуса, пульсаций скорости и периодов качки настоящего корабля, в том числе с включением тяги условных движителей и моментов от рулевых устройств, для воссоздания условий управляемого маневрирования корабля под воздействием интенсивного штормового волнения.

Маневры корабля в вычислительном эксперименте проходят по плавным траекториям циркуляции; также плавно происходит набор и по-

теря хода, что в целом соответствует реальной гидромеханике со всеми шестью степенями свободы по угловым и поступательным видам качки; с проявлением крена на циркуляции и ходовым дифферентом при разгоне и торможении корабля; и что особо важно – с переменной скоростью хода в зависимости от характера силового взаимодействия корпуса с конкретными гребнями штормовых волн, включая возможность дельфинирования, или захвата корпуса волной и брочинга, с опрокидыванием на попутной волне.

Предусматривается интерактивное изменение факторов демпфирования качки и метацентрической высоты h_x для корпуса на тихой воде, для чего относительно метацентра m_x фиксируется иная аппликата центра тяжести ($G_z = m_x - h_x$), что требуется для оценок крена на циркуляции и качки на штормовом волнении, и может применяться для постановки на киль в случае аварийного опрокидывания.

Циркуляция корабля управляется указанием нового курса в румбах с перекладкой руля «на борт», на «полборта» и при работе авторулевого с перекладкой «по малу», как это обычно делается в штормовых условиях для сбережения рулевой машины, допуская свободное рыскание с отклонением от курса под интенсивным воздействием штормового волнения (*угловая скорость на циркуляции здесь не зависит от скорости хода*).

Плавное изменение скорости хода регулируется тягой двигателей с сопротивлением движению по условно «тихой воде», что допускает как потерю штормового хода на интенсивном волнении, так и разгон с дельфинированием на гребнях попутных волн (*при остановленных машинах демпфирование хода применяться к полной скорости остаточного движения*).

Также как и при моделировании морского волнения в вычислительном эксперименте задействуются различные по сложности гидродинамические модели качки корабля.

1. Простейший или тестовый вариант строится на кинематическом скольжении корпуса корабля относительно двух пар точек вдоль и поперек корпуса. По чисто математического волновому полю шаг по времени соответствует темпу графической визуализации.

2. В относительно быстром варианте моделирования вычисляется погруженный объём корпуса, переменная составляющая которого создает вертикальную Архимедову силу всплытия и погружения. Чисто вертикальная или гравитационная компонента этих сил вызывает килевую, бортовую и вертикальную качку. Дополнительные горизонтальные компоненты обуславливаются интегрально осредненным наклоном ватерлинии и поверхностей равных давлений воды, отчего образуются перепады гидростатических сил на противоположных бортах корпуса корабля. Задействие всех внешних сил и моментов означает воссоздание в моделировании всех шести компонент угловой и поступательной динамики корпуса корабля в условиях штормового волнения.

3. Вместо расчётов погруженного объёма корпуса выполняется интегрирование гидростатических давлений по смоченной поверхности судовой обшивки под взволнованной поверхностью моря. В таком векторном интегрировании вычисляются в точности аналогичные силы всплытия, создающие такие же поступательные и угловые ускорения для моделирования всех шести компонент штормовой качки корабля.

4. Предыдущий вариант дополняется учётом подповерхностных скоростей течений, касательные компоненты которых несколько снижают давление воды на поверхности судовой обшивки, а отражаемые корпусом нормальные компоненты набегающих потоков создают антисимметричные импульсы сил, усугубляющих рыскание, слеминг и опасность захвата корпуса гребнем штормовой волны.

Достоинством геометрических алгоритмов является то, что вычисление погруженного объёма корпуса выполняется по элементарным тетра-

эдрам, которые являются основаниями треугольников с распределёнными давлениями воды на смоченной поверхности судовой обшивки, отчего эффективность интегрирования объёмных или поверхностных сил всплытия вполне соизмерима. Несколько большие вычислительные ресурсы востребуются для явного учёта компонент внешних течений вдоль судовой обшивки, и потоков отражаемых от движущегося корпуса, но всё же, и здесь замедление вычислительного эксперимента критическим не оценивается.

Полное дифференциально-разностное моделирование²¹ штормового волнения не востребует эмпирики вихреисточников для учёта и компенсации больших скоростей, (не)протекающих сквозь судовую обшивку, так как изменение гидродинамического давления становится составной частью математической модели. Однако здесь несколько затрудняются корректные оценки гидростатического давления под быстроменяющимся контуром действующей ватерлинии. В вариантах с глубоководными трохоидальными пакетами штормовых волн с дисперсионными свойствами, также как и в длинноволновых моделях морского волнения в полных потоках, независимо от алгоритмов генерации привходящих волн в расчётах задействуется дополнительный комплекс дифференциально-разностных операций на адаптивных сеточных пространствах по всей относительно большой морской акватории, и в таком случае значительно возрастает востребованность оперативной памяти и вычислительных ресурсов для параллельного моделирования гидродинамики и независимого распространения корабельных волн с наложениями отраженных от корпуса корабля внешних пакетов штормовых волн.

²¹ Вариант моделирования в разработке, по нему ещё нет заключений о корректности гидромеханики силового взаимодействия корабля и штормового моря.

Модель корпуса строится в естественном масштабе корабельных координат с начальным отсчётом от мидельшпангоута на уровне ватерлинии при заданной осадке.

Алгоритм настроен на последовательную переборку треугольников $\Delta\{a, b, c\}$ между расчётными шпангоутами внутри шпаций бортовой обшивки.

Особая предустановка углов треугольника выполняется для действующей ватерлинии, где первые две вершины интерполируются по точкам пересечения подвижного контура a, b вдоль ватерлинии, с третьим углом c для пары бимсов к противоположному борту, что образует поверхность действующей ватерлинии со специальной пометкой $Level = 0$;

Вычисления разделяются на этапы: сначала по подводным обводам ($Level < 0$); затем по поверхности действующей ватерлинии ($Level = 0$), и затем – по замкнутым контурам надводного борта ($Level > 0$) с обобщенными элементами общекорабельной архитектуры.

На каждом шаге собственно вычислительного эксперимента ведётся полный пересмотр всех элементарных треугольников в погруженной под воду части бортовой обшивки и на уровне действующей ватерлинии, в котором вместо графической визуализации производится ускоренный перерасчёт геометрических характеристик корпуса с учётом быстрой кинематики взволнованной поверхности моря. Для этого задействуются те же самые алгоритмы выборки узлов по шпациям, с перестроением треугольников на уровне действующей ватерлинии.

Совмещение алгоритмов трёхмерной визуализации с исчислением геометрических интегралов по корабельным обводам изначально предусматривались проектом вычислительного эксперимента, что считалось важным для сквозного визуального контроля корректности геометриче-

ских вычислений совместно с оценками адекватности моделирования гидродинамических явлений в условиях разделения независимых процессов штормовой гидромеханики корабля.

Свободный вектор нормали в корабельной системе координат содержит площадь элементарного треугольника на бортовой обшивке:

$$\overleftarrow{S} = (\overleftarrow{a} - \overleftarrow{c}) \times (\overleftarrow{b} - \overleftarrow{c}) / 2 = [\overleftarrow{ac} \times \overleftarrow{bc}] / 2, \quad [m^2]$$

и, соответственно, величина площади этого треугольника: $W = |\overleftarrow{S}|$.

Центр площади треугольника задаётся определенным вектором с привязкой к началу корабельной системы координат (на конструктивной ватерлинии и мидельшпангоуте):

$$\overleftarrow{L}_s = (\overleftarrow{a} + \overleftarrow{b} + \overleftarrow{c}) / 3 = \overleftarrow{c} + (\overleftarrow{ac} + \overleftarrow{bc}) / 3, \quad [m]$$

Определённый вектор для центра объёма элементарного тетраэдра того же элемента бортовой обшивки в корабельном базисе:

$$\overleftarrow{L}_v = (\overleftarrow{a} + \overleftarrow{b} + \overleftarrow{c}) / 4, \quad [m]$$

объём этого тетраэдра получается скалярным (смешанным) произведением:

$$V = \overleftarrow{c} \cdot \overleftarrow{S} / 3 = \overleftarrow{c} \cdot [\overleftarrow{ac} \times \overleftarrow{bc}] / 6. \quad [m^3]$$

Интегрированием всей поверхности судовой обшивки получаются геометрические характеристики погруженных обводов корпуса. Площадь смоченной поверхности, погруженный объём корпуса (объёмное водоизмещение) и корабельные координаты центра величины корпуса:

$$iS = \sum W; \quad iV = \sum V; \quad \overleftarrow{vB} = \frac{\sum \overleftarrow{V} \cdot \overleftarrow{M}}{iV},$$

или поэлементным алгоритмам площадь обшивки: Surface:

$$iS = \sum_{\Delta} |\overset{\leftarrow}{S}| = \sum_{\Delta} \frac{(\overset{\leftarrow}{a} - \overset{\leftarrow}{c}) \times (\overset{\leftarrow}{b} - \overset{\leftarrow}{c})}{2}; \quad [M^2]$$

водоизмещение: Volume:

$$iV = \sum_{\Delta} \frac{\overset{\leftarrow}{S} \cdot \overset{\leftarrow}{c}}{3} = \sum_{\Delta} \frac{[(\vec{a} - \vec{c}) \times (\overset{\leftarrow}{b} - \overset{\leftarrow}{c})] \cdot \overset{\leftarrow}{c}}{6}; \quad [M^3]$$

центр величины: Buoyancy:

$$\overset{\leftarrow}{v}B = \frac{\sum_{\Delta} (\overset{\leftarrow}{a} + \overset{\leftarrow}{b} + \overset{\leftarrow}{c}) \cdot \{[(\overset{\leftarrow}{a} - \overset{\leftarrow}{c}) \times (\overset{\leftarrow}{b} - \overset{\leftarrow}{c})] \cdot \overset{\leftarrow}{c}\}}{24 \cdot V}, \quad [M]$$

где $\overset{\leftarrow}{a}$, $\overset{\leftarrow}{b}$ и $\overset{\leftarrow}{c}$ – три вершины треугольника в корабельном базисе.

Поступательные ускорения и приращения скорости в движении корабля определяются инерционными реакциями массы/объёма корпуса, в то время как компоненты угловых ускорений на качке и рыскании – с подобными массовыми/объёмными реакциями от тензора инерции.

Пространственный тензор инерции представляется компонентами осевых и центробежных моментов, формализуемых симметричными матрицами, как:

$$\hat{J} = \begin{vmatrix} J_{xx} & -J_{xy} & -J_{xz} \\ -J_{yx} & J_{yy} & -J_{yz} \\ -J_{zx} & -J_{zy} & J_{zz} \end{vmatrix} = \rho \cdot \int_{\omega} \begin{vmatrix} y^2 + z^2 & -x \cdot y & -x \cdot z \\ -x \cdot y & x^2 + z^2 & -y \cdot z \\ -x \cdot z & -y \cdot z & y^2 + x^2 \end{vmatrix} d\omega \quad [кг \cdot м^2]$$

где: ρ – плотность жидкости, ω – элемент объёма, здесь V – тетраэдр.

Тензор инерции для объёма/массы корпуса вычисляется по сопряженным с судовой обшивкой тетраэдрам, имеющим общие вершины в основании корабельного базиса на мидельшпангоуте и конструктивной ватерлинии:

$$\begin{aligned}
J_{xx} &= a \cdot y^2 + b \cdot y^2 + c \cdot y^2 + a \cdot z^2 + b \cdot z^2 + c \cdot z^2 + \\
&+ a \cdot y \cdot b \cdot y + a \cdot y \cdot c \cdot y + b \cdot y \cdot c \cdot y + a \cdot z \cdot b \cdot z + a \cdot z \cdot c \cdot z + b \cdot z \cdot c \cdot z; \\
J_{yy} &= a \cdot x^2 + b \cdot x^2 + c \cdot x^2 + a \cdot z^2 + b \cdot z^2 + c \cdot z^2 + \\
&+ a \cdot x \cdot b \cdot x + a \cdot x \cdot c \cdot x + b \cdot x \cdot c \cdot x + a \cdot z \cdot b \cdot z + a \cdot z \cdot c \cdot z + b \cdot z \cdot c \cdot z; \\
J_{zz} &= a \cdot x^2 + b \cdot x^2 + c \cdot x^2 + a \cdot y^2 + b \cdot y^2 + c \cdot y^2 + \\
&+ a \cdot x \cdot b \cdot x + a \cdot x \cdot c \cdot x + b \cdot x \cdot c \cdot x + a \cdot y \cdot b \cdot y + a \cdot y \cdot c \cdot y + b \cdot y \cdot c \cdot y; \\
J_{xy} &= J_{yx} = (2 \cdot a \cdot x \cdot a \cdot y + 2 \cdot b \cdot x \cdot b \cdot y + 2 \cdot c \cdot x \cdot c \cdot y + \\
&+ a \cdot x \cdot b \cdot y + a \cdot x \cdot c \cdot y + b \cdot x \cdot c \cdot y + a \cdot y \cdot b \cdot x + a \cdot y \cdot c \cdot x + b \cdot y \cdot c \cdot x) / -2; \\
J_{xz} &= J_{zx} = (2 \cdot a \cdot x \cdot a \cdot z + 2 \cdot b \cdot x \cdot b \cdot z + 2 \cdot c \cdot x \cdot c \cdot z + \\
&+ a \cdot x \cdot b \cdot z + a \cdot x \cdot c \cdot z + b \cdot x \cdot c \cdot z + a \cdot z \cdot b \cdot x + a \cdot z \cdot c \cdot x + b \cdot z \cdot c \cdot x) / -2; \\
J_{yz} &= J_{zy} = (2 \cdot a \cdot y \cdot a \cdot z + 2 \cdot b \cdot y \cdot b \cdot z + 2 \cdot c \cdot y \cdot c \cdot z + \\
&+ a \cdot y \cdot b \cdot z + a \cdot y \cdot c \cdot z + b \cdot y \cdot c \cdot z + a \cdot z \cdot b \cdot y + a \cdot z \cdot c \cdot y + b \cdot z \cdot c \cdot y) / -2, \quad [M^2]
\end{aligned}$$

$$\text{inMass} \overset{\times}{=} \rho \cdot V \cdot \overset{\times}{\mathbf{J}} / 10 \quad [кг \cdot м^2]$$

В реальной практике тензор инерции $\overset{\times}{\text{inMass}}$ должен относиться к распределению масс по корпусу, по грузам и бортовому оборудованию, что существенно для расчётов нагрузок и обеспечения прочности корпуса. В оценочной и однообразной формализации характеристик различных кораблей и судов в условиях интенсивного внешнего волнового воздействия можно воспользоваться вышеуказанным условным распределением масс по равномерно заполненному водой корпусу, с последующим смещением от метацентра вниз по метацентрической высоте, к специально определяемому, таким образом, центру масс корабля.

Для приведения тензора инерции к центру тяжести корабля, предвычисляемого по метацентрической высоте под аппликацией метацентра на тихой воде: $G \cdot z = m \cdot z - h_x$, используется теорема Христиана Гюйгенса – Якоба Штейнера (*Huygens–Steiner theorem*) о параллельном смещении осей вращения (*parallel axis*) или центра масс, где метод перерасчёта синтезируется как: $J_{ij} = I_{ij} + \rho \cdot V \cdot (L^2 \delta_{ij} - R_i R_j)$, где $L\{x, y, z\} = \overset{\leftarrow}{G}$ – вектор

смещения осей вращения от действующего центра масс, δ_{ij} – единичная матрица. В композиции с диадой и шаровым тензором такая поправка формулируется как:

$$|L|^2[\delta_{ij}] - [L \cdot L^T] = \begin{bmatrix} x^2 + y^2 + z^2 & 0 & 0 \\ 0 & x^2 + y^2 + z^2 & 0 \\ 0 & 0 & x^2 + y^2 + z^2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x^2 & x \cdot y & x \cdot z \\ y \cdot x & y^2 & y \cdot z \\ z \cdot x & z \cdot y & z^2 \end{bmatrix}, \quad [M^2]$$

иная эвристика с кососимметричной матрицей местоположения:

$$-[L][L] = - \begin{bmatrix} 0 & -z & y \\ z & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{bmatrix}^2 = \begin{bmatrix} y^2 + z^2 & -x \cdot y & -x \cdot z \\ -y \cdot x & x^2 + z^2 & -y \cdot z \\ -z \cdot x & -z \cdot y & x^2 + y^2 \end{bmatrix}. \quad [M^2]$$

В вычислительном эксперименте по моделированию штормовой гидромеханики корабля задействуются объёмные интегралы по корпусу, либо поверхностные – по векторам градиентов давлений на судовой обшивке. Относительно корабельного базиса внешнее воздействие штормовых волн приводится к центру величины $\leftarrow vB$, в то время как инерционные или массовые реакции сдвигаются по аппликате – к центру тяжести $\leftarrow G$, определяемому в начальных условиях с помощью поперечной метацентрической высоты h_x для тихой воды.

После самого первого подготовительного шага вычислительного эксперимента результаты расчётов на тихой воде переписываются исходным числовым объектам: $\leftarrow Floatage = iF$, $\leftarrow Surface = iS$, $\leftarrow Volume = iV$, $\leftarrow Buoyancy = vB$, $\leftarrow \times inMass = mM$ и др. для фиксации геометрических, инерционных и гидростатических параметров корабля на тихой воде без качки.

Движущийся корабль представляет собой сложный конгломерат условно твёрдого тела со своим динамическим центром тяжести, в окружении тяжелой воды с геометрическим центром величины, но при этом плечо реактивных сил должно опираться на некий центр бокового сопротив-

ления, в свою очередь определяемого по весьма непростым гидростатическим зависимостям для реальной поверхности судовых обводов в условиях интенсивного морского волнения.

Метацентрические характеристики в экспресс оценках текущего состояния корабля

Метацентрические формулы никак не задействуются в вычислительном эксперименте, однако традиционные представления об остойчивости на больших углах крена и дифферента весьма любопытны для визуальных экспресс оценок состояния корабля в условиях интенсивного штормового волнения. Вычисления метацентрических характеристик с использованием поверхности действующей ватерлинии выделяются в особый блок, привносящий излишнюю вычислительную нагрузку, результаты расчётов которого используются только в графических операциях при визуализации корпуса корабля в условиях морского волнения.

Площадь действующей ватерлинии iF и интегрально осреднённый вектор нормали к поверхности воды $\overleftarrow{\nu W}$ внутри контура действующей ватерлинии, или иначе, $\overleftarrow{\nu W}$ – вектор интегрально осредненного наклона волнового склона, рассекаемого корпусом корабля, отличающийся некоторым уменьшением активной величины за счёт искривления поверхности действующей ватерлинии:

$$iF = \sum W; \quad \overleftarrow{\nu W} = \frac{\sum \overleftarrow{S}}{iF},$$

где $W = |\overleftarrow{S}|$ – площадь элементарного треугольника на поверхности ватерлинии.

Центр элементарного треугольника на поверхности ватерлинии отличается от центра объёма тетраэдра с нулевым базисом лишь константой

4/3, что можно использовать во избежание повторов векторных сумм при вычислении центра площади ватерлинии:

$$\overset{\leftarrow}{v}F = \frac{\sum W \cdot \overset{\leftarrow}{L}_s}{iF} = \frac{\sum W \cdot (\overset{\leftarrow}{a} + \overset{\leftarrow}{b} + \overset{\leftarrow}{c})/3}{iF}$$

Метацентрические формулы выражаются в подвижном корабельном базисе, в то время как внешние силовые воздействия определяются в глобальной морской системе координат. Без специальной математики (тензорного исчисления) метацентрическая теория корректна лишь в случаях малых углов крена и дифферента, то есть, справедлива лишь в представлении начальной остойчивости.

Метацентрические оценки остойчивости весьма коварны, так как усиление (начальной) остойчивости отзывается интенсивной или опасной реакцией на прямое действие склонов и гребней морских волн, даже в случае относительно слабого или умеренного штормового волнения.

Динамически корректно метациентр ориентировать по вертикали относительно площади действующей ватерлинии, которая стремительно меняется в процессе килевой и бортовой качки, и, соответственно, метацентрические расчёты рушатся при полном погружении или выходе корпуса корабля из воды.

Вновь замечая, что в вычислительном эксперименте эти расчёты не используются, для формального расчёта метацентрического радиуса воспользуемся осевым моментом инерции площади действующей ватерлинии относительно продольной оси (оси абсцисс), по отдалению точек на действующей ватерлинии:

$$a.r = \sqrt{a.z^2 + a.y^2} .$$

Проекция площади элементарного треугольника в плоскости конструктивной ватерлинии будет *без смены знака или обнуления*:

$$W_F = | a \cdot x \cdot b \cdot r - a \cdot r \cdot b \cdot x | / 2,$$

и компоненты тензора инерции площади ватерлинии с отсчётами от мидельшпангоута на диаметральной плоскости с уровнем ватерлинии:

$$I_{xy} = I_{yx} += (a \cdot x \cdot b \cdot r + 2 \cdot a \cdot x \cdot a \cdot r + 2 \cdot b \cdot x \cdot b \cdot r + b \cdot x \cdot a \cdot r) \cdot W_F / 12;$$

$$I_x += (a \cdot r \cdot a \cdot r + a \cdot r \cdot b \cdot r + b \cdot r \cdot b \cdot r) \cdot W_F / 6;$$

$$I_y += (a \cdot x \cdot a \cdot x + a \cdot x \cdot b \cdot x + b \cdot x \cdot b \cdot x) \cdot W_F / 6.$$

Сильное искривление поверхности ватерлинии на волновых склонах будет отчасти завышать мгновенные величины метацентрических радиусов: $r = I_x / Volume$, в целом корректно характеризую мгновенные оценки традиционной метацентрической остойчивости в условиях крупного волнения.

Соответственно, метацентрические радиусы получаются частным от деления на текущее водоизмещение, с учётом изменения водоизмещения на волновых склонах²²:

$$r = I_x / iV - \text{поперечный метацентрический радиус (под крен);}$$

$$R = I_y / iV - \text{продольный метацентрических радиус (дифферент).}$$

Небольшая корректировка метацентрических радиусов на снижение остойчивости при сильно искривленной поверхности действующей ватерлинии может быть выполнена с помощью осредненного вектора нормали к площади ватерлинии: $vW_z = (W_{\text{апликаты}} / F_{\text{полная площадь}})$:

$$r \times = /vW_z/; \quad R \times = /vW_z/.$$

Центр тяжести \overleftarrow{G} – приводится к вертикали центра величины \overleftarrow{B} без качки на тихой воде, с переустановкой апликаты ниже поперечного метацентра \overleftarrow{M} на величину заданной метацентрической высоты: h_x .

$$\overleftarrow{G} = \{ B.x, B.y, m.x - h_x \}.$$

Результаты метацентрических расчётов используются в графиках и надписях с информацией о текущем состоянии корабля, что полезно при

²² Метацентрические воззрения используются только в визуализации результатов, – в моделировании динамики корабля оценки по тихой воде корректны лишь условно.

быстрых прогнозах безопасности корабля по традиционным представлениям о метацентрической высоте h_x в условиях интенсивной качки на крупном волнении.

Метацентр изображается *не в точке его действия над центром ватерлинии*, а по вертикали метацентрического радиуса над центром величины во внешней морской системе отсчёта, в зависимости от величины метацентрической высоты h_x он подкрашивается **зеленым** цветом при увеличении относительно начальной остойчивости; **жёлтым** – при уменьшении; и **красным** – если остойчивость исчисляется отрицательной.

Углы Крылова в визуальном представлении состояния корабля

В работе используются углы Крылова в последовательности z-y-x (рыскание–дифферент–крен) с навигационными отсчётами по часовой стрелке. Угловые величины накапливаются дифференциальными дополнениями в темпе вычислительного шага во времени (*вместо однозначных тензорных произведений*), отчего востребуется постоянная корректировка углов Крылова для согласования с тензорным базисом корабельных координат.

Переопределённость в применении трёх угловых величин служит неоднозначностям в последовательностях трёх поворотов, что лишь отчасти исправляется малыми дифференциальными приращениями в операциях интегрирования угловых скоростей, и систематические погрешности рас-согласуют независимое счисление углов²³ и матриц поворота.

Собственно в динамике корабля вполне достаточно применения тензорных произведений, как с координатными, так и с угловыми приращениями при относительно малых шагах интегрирования во времени. Тогда

²³ ... если первый поворот в морском базисе по вертикали Z; второй – в корабельной системе отсчета по абсциссе x; третий – включает проекции двух первых – на траверз Y(y), что корректно для выбора курса, и только в малых угловых приращениях сохраняются суть предопределений как: рыскание–удифферентовка–накренение.

как для контроля состояния корабля и визуализации маршрута его движения в традиционных географических измерениях необходимо выбрать стандартный метод выборки текущих абсолютных (больших) угловых величин курса, крена и дифферента корабля.

Пусть последовательность вычисления величин никак не влияет на исходную матрицу и на величины искомых угловых отсчётов, тогда синтез вектора ориентации корпуса корабля получится с помощью трёх независимых операций.

Можно ввести определения. Все динамические расчёты выполняются в локальной системе координат, образованной тензором ориентации²⁴ $\hat{\mathbf{r}} = \mathbf{r}^{-1} = \begin{vmatrix} \vec{x} & \vec{y} & \vec{z} \end{vmatrix}$, образуемым тройцей столбцов матрицы, которые в корабельном базисе являются ортонормированными (единичными) векторами: \overleftarrow{x} – абсциссы; \overleftarrow{y} – ординаты; \overleftarrow{z} – аппликаты.

Тогда в глобальной морской системе координат будут определяться отчасти зависимые направления, как:

\vec{Z} – вертикаль – первый базовый вектор вертикальной ориентации к зениту в глобальной морской системе координат, по оси которой отмеряется курс корабля относительно географического меридиана;

$\vec{Y} = \vec{e}\{\vec{x} \times \vec{Z}\}$ – траверз правого борта, по оси которого отмечается дифферент корабля, становится неопределённым, если ось абсцисс сближается с вертикалью $(\vec{x} \cdot \vec{Z}) \neq 0$; и в таком случае направление курса корабля будет допускать измерение произвольного крена, включая опрокидывание или вращение корпуса на внутренней оси абсцисс, как:

$$\vec{X} = \vec{e}\{\vec{Z} \times [\vec{x} \times \vec{Z}]\}.$$

²⁴ обратная матрица ориентации $\hat{\mathbf{r}}$ с локальными векторами – строками $\begin{vmatrix} \overleftarrow{x} & \overleftarrow{y} & \overleftarrow{z} \end{vmatrix}$ задаёт точные и однозначные кинематические решения, где в случае больших углов теряется суть корабельных терминов для «курса», «крена» и «дифферента».

Здесь векторная функция $\vec{e}\{r\}$ – означает единичную нормировку вектора.

1) – курс корабля v оценивается по следу корабельной оси абсцисс \overleftarrow{x} , вертикально спроецированной на горизонтальную поверхность водной глади:

$$\vec{X} = \vec{Z} \times [\vec{x} \times \vec{Z}]; \quad v = \text{atan2}(X.y, X.x).$$

2) – для получения дифферента такая ориентация курса в горизонтальной плоскости переводится в локальный корабельный базис, тогда обратное измерение угла будет отмечать дифферент корпуса без учёта текущего угла крена:

$$\overleftarrow{x} = \vec{X} / \mathbf{r}; \quad \varphi = \text{atan2}(x.z, x.x).$$

3) – угловая величина крена получается переводом видимой вертикали – зенита в корабельный базис, что позволяет оценивать крен по наблюдаемому с борта корабля наклону палубы, в предположении, конечно, что угол дифферента меньше прямого:

$$\overleftarrow{z} = \vec{Z} / \mathbf{r}; \quad \vartheta = \text{atan2}(z.y, z.z).$$

Кинематические процессы в вычислительном эксперименте основаны на строго однозначных тензорных произведениях, а угловые величины синтезируются для использования в законах управления курсом и ходом корабля, а также для визуализации графиков и цифровых надписей, и на практике задействуются в прокладках маршрута корабля.

Обратное преобразование становится правилом выбора последовательности поворотов локального корабельного базиса, в которых желательно использование независимых операций, где каждый поворот не влияет на ориентацию по двум другим ортогональным осям, или иначе говоря – строго по трём операциям из возможных шести вариантов вращения твёрдого тела.

Можно воспользоваться специальной тензорной функцией поворота корабельного базиса относительно произвольной пространственной оси $\hat{\mathbf{rot}}(\alpha, \vec{r})$, где α – величина угла поворота, и \vec{r} – вектор ориентации оси вращения.

1) – установка нового курса – изменение угла рыскания $\delta\nu$ выполняется относительно вертикального вектора направления к зениту в глобальной морской систем координат:

$$\hat{\mathbf{rot}}(\delta\nu, \vec{Z});$$

2) – изменение угла крена $\delta\vartheta$ по оси базисного вектора абсцисс в отсчётах глобального морского базиса, с такой же регистрацией нового состояния корпуса в тензоре корабельного базиса:

$$\hat{\mathbf{rot}}(\delta\vartheta, \vec{x});$$

3) – при изменении угла дифферента $\delta\phi$ требуется выполнение сохранения углов курса и крена, для чего поворот осуществляется в смешанном базисе, по проекции локальной оси ординат \vec{y} на горизонтальную поверхность водной глади:

$$\hat{\mathbf{rot}}(\delta\phi, \vec{Z} \times [\vec{y} \times \vec{Z}]).$$

В приведённых геометрических операциях и преобразованиях допускается работа с произвольными углами поворота или полного разворота по курсу-рысканию и крену-опрокидыванию, кроме дифферента, который ни при каких условиях не должен приближаться к величине 90° . В вычислительном эксперименте установлено ограничение²⁵ до 84° .

²⁵ лучше, наверное, ограничивать максимальным углом склона стоячей волны 60°

В гидростатическом моделировании распределенных по обшивке корабля давлений воды результат не отличается от расчётов объёмной архимедовой плавучести, однако в таком варианте возможно внесение поправок для учёта проскальзывания и отражения скоростных потоков набегающей жидкости. Воспользуемся правилом соотношения силы давления воды к центру элементарного треугольника на бортовой обшивке, которая в качестве свободного вектора применяется без учёта точки приложения:

$$\vec{f} = (p_i + \rho \cdot g \cdot h_z) \cdot \vec{s} \quad [H, \text{кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2]$$

где p_i – избыточное и гидродинамическое давление, например – на поверхности моря или под воздействием локальных скоростных потоков жидкости; h_z – аппликата погружения центра площади треугольника; \vec{s} – вектор нормали с площадью элементарного треугольника в корабельном базисе. Как вариант, свободный или главный вектор сил давления на смоченную обшивку корпуса²⁶ просуммируется:

$$\vec{v}S = \sum_{\Delta} g \cdot h_z \vec{\delta s} \quad [H/\rho, \text{м}^4 / \text{с}^2]$$

Аппликата точки приложения силы от гидростатического давления воды вычисляется с использованием момента инерции площади по секущим хордам – сторонам треугольника в проекциях на вертикальную плоскость.

$$h_{\Delta} = h_z + \frac{I_c}{h_z \cdot s_z} \quad [M]$$

где s_z – проекция площади элементарного треугольника на вертикальную плоскость; $h_z = (z_0 + z_1 + z_2)/3$ – аппликата центра площади треугольника. В случае почти горизонтальных площадок поправка к аппликате h_{Δ} будет

²⁶ В уравнениях движения в делителе всегда присутствует масса или момент инерции, что формально позволяет опускать множитель ρ – плотность воды.

обнуляться, а сила от давления просто сведётся к центру площади расчётного треугольника h_z .

В вычислении осевого момента инерции треугольника s_z в проекциях на вертикальную плоскость участвуют только величины его аппликата с величиной его площади:

$$I_s = s_z \cdot \left[(z_1^2 + z_2^2 + 3 \cdot z_0 \cdot (z_0 - z_1 - z_2) + z_1 \cdot z_2) / 6 - (z_0 - h_z)^2 \right] \quad [M^4]$$

с приведением к центру площади расчётного треугольника; – нижние индексы отмечают три его вершины.

Соответственно, аппликата точки приложения сил давления воды на элементарном треугольнике смоченной судовой обшивки:

$$h_{\Delta} = h_z - \frac{(z_0 - h_z)^2}{h_z} + \frac{z_1^2 + z_2^2 + 3 \cdot z_0 \cdot (z_0 - z_1 - z_2) + z_1 \cdot z_2}{6 \cdot h_z}, \quad [M]$$

и, судя по всему, применение этой формулы вполне безопасно, так как для погруженного под воду треугольника с площадью $s_z > 0$ аппликата его центра h_z при отсчётах от уровня воды не может обнуляться. Обратим внимание на геометрические особенности точки приложения силы давления. Для треугольника с двумя точками на ватерлинии $\Delta.z\{0,0,1\}$ такой центр на половине вертикали: $h_{\Delta} = 0,5$ ($h_z = 1/3$); – если наверху только одна точка $\Delta.z\{0,1,1\}$, то центр силы опускается $h_{\Delta} = 0,75$ ($h_z = 2/3$); – для двух треугольников – параллелограмма: $\square.z\{0,0,1,1\}$ – $h_{\Delta} = 0,625$ ($h_z = 0,5$). При заглублении точка концентрации силы давления по мере заглубления сближается с центром площади элементарного треугольника.

Для приведения вертикальной точки к поверхности треугольника можно выполнить двойное векторное произведение с нормировкой относительно разности $\delta h = h_z - h_{\Delta}$.

$$\vec{r}_{\Delta} = \vec{r}_z - \delta h \cdot \vec{n}_s \times \frac{\vec{z} \times \vec{n}_s}{|\vec{z} \times \vec{n}_s|},$$

→

где: r_z – координаты центра площади треугольника в локальной (корабельной) системе координат; \vec{n}_s – нормаль к площади треугольника; \vec{z} – вертикаль.

В гидростатических расчётах действующий угловой момент отсчитывается сразу от центра масс корабля \overleftarrow{G} :

$$\overleftarrow{\nu R} = g \cdot \sum_{\Delta} h_z \cdot (\overleftarrow{r}_{\Delta} - \overleftarrow{G}) \times \overleftarrow{\delta s}, \quad [H \cdot m / \rho, m^5 / c^2]$$

где: $\overleftarrow{r}_{\Delta}$ – координаты центра гидростатического давления на элементарном треугольнике с приведением относительно аппликаты его центра площади h_z , G – координаты центра масс корабля, δS – вектор нормали с величиной площади элементарного треугольника. Но всё же остаются вопросы корректности отсчётов строго по вертикали от *локального уровня под гребнями волн* и скулой корабельного корпуса.

Если вектор главной силы νS является свободным вектором, то интегральный вектор гидростатического момента $\overleftarrow{\nu R}$ получается связанным с фиксированным центром масс корабля \overleftarrow{G} . Тогда, скользящий вектор главной силы может считаться проходящим через точку приведения:

$$\overleftarrow{G} + = \overleftarrow{\nu R} \times \overleftarrow{\nu S} / |\overleftarrow{\nu S}|^2, \quad [M]$$

с предосторожностями при обнулении величины вектора $\overleftarrow{\nu S}$, когда вектор действующего момента $\overleftarrow{\nu R}$ обретает свойства свободного вектора. Скалярное произведение векторов силы и момента оценивает минимальный вращательный момент в механической системе сил, и называется «приведением к динамо»:

$$\overleftarrow{\nu R}_{мин} = (\overleftarrow{\nu R} \cdot \overleftarrow{\nu S}) / |\overleftarrow{\nu S}|.$$

Гидростатический вектор сил всплытия $\vec{v}S$ в морской системе координат ориентирован по вертикали, и не обращается в ноль, *если весь корпус не выходит из воды.*

Механика корабля как твёрдого тела реализуется со значительным смещением относительно центра масс корабля \overleftarrow{G} в сторону условного центра бокового сопротивления корпуса ЦБС $= f(\sum s_z \cdot h_\Delta)$, местоположение которого зависит также от переменчивых гидродинамических давлений и пульсаций сил отражаемых корпусом частиц жидкости, в том числе под воздействием быстрых потоков под поверхностью трохоидального волнения.

Этот вопрос рассматривается ниже, после введения ходовой и волновой гидродинамики вблизи смоченной обшивки, и определения особенностей проявления факторов демпфирования и присоединённых масс жидкости.

Ходовой и волновой поток вблизи судовой обшивки

Интегрирование распределённых давлений, в отличие от прямых оценок погруженного объёма, позволяет совмещать гидростатические эффекты в едином процессе гидродинамического моделирования с учётом ходового набегающего потока совместно с оценками импульсных воздействий подповерхностных течений в условиях интенсивного морского волнении.

Каждый элемент судовой обшивки $\overleftarrow{\delta s}$ [м²] омывается локальным потоком жидкости со скоростью \overleftarrow{v} [м/с], обусловленной поступательной \overleftarrow{V} и угловой \overleftarrow{W} интенсивностью качки в отсчётах относительно центра масс корабля \overleftarrow{G} , зафиксированного на вертикали поперечного метacentра

тихой воды \overleftarrow{M} с отступом по аппликате на величину метацентрической высоты h_x в корабельной системе координат.

$$\overleftarrow{v}_s = \overleftarrow{V} + \overleftarrow{W} \times (\overleftarrow{L} - \overleftarrow{G}), \quad [м/с]$$

где \overleftarrow{L} [м] – корабельные координаты центра элементарного треугольника.

Вычислительная модель внешнего волнового воздействия строится с использованием скорости течений жидкости вблизи элементарной площади судовой обшивки, без учёта относительно малого локального или собственного вращения в соприкосновении с корпусом корабля.

В работах с полями давлений по поверхности судовой обшивки потребуются уточнения по давлению жидкости в рамках гидродинамических зависимостей закона Бернулли, устанавливающего неизменность «полного давления» в жидкости:

$$\rho \cdot \frac{v^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_z + p_a = const \quad [кг/м^2]$$

где $\rho = 1025$ [кг/м³] – плотность морской воды; v [м/с] – вызванная скорость течения вблизи судовой обшивки *без учёта скорости хода корабля*; p_a [кг/м/с²] – избыточное внешнее давление, в том числе под влиянием атмосферы. Полное давление, в случае необходимости, фиксируется для случая судна без хода, без качки и без воздействия на него внешнего морского волнения как: $p_g = \rho \cdot g \cdot h_z + p_a$, где давление атмосферы служит предотвращению преждевременного вскипания жидкости или её кавитационного разрыва при $p_g \leq 0$.

Полная вычислительная модель в малых конечных объёмах строится на принципах непротекания смоченной обшивки корпуса, на которой вызванные волнами скользящие потоки будут влиять на изменение локального давления. При локальной скорости более скорости хода давление

снижается, при подтормаживании потока – давление будет немного возрастать:

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

где V_v – скорость хода корабля, V_w – скорость потока, скользящего в плоскости элементарного треугольника.

Относительная скорость потока вблизи судовой обшивки вычисляется векторным сложением скоростей волнового потока и собственной скорости элемента обшивки на подвижном корпусе в локальной корабельной

системе отсчёта: $v = \vec{V}_w - \vec{v}_s$, где v_s [м/с] – поступательное движение площадки судовой обшивки; \vec{V}_w – скорость волнового потока, переведенного в корабельный базис: $\vec{V}_w = V_w / \mathbf{r}$.

Скорость хода корабля должна представляться некой интегрально осредненной величиной по смоченной поверхности. В любом случае поправка по Бернулли приводит к условно симметричному подвсплытию корпуса за счёт небольшого повышения гидродинамического давления в оконечностях корпуса корабля.

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

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

где: δp – изменение давления воды на элементе бортовой обшивки.

Векторные обозначения здесь существенны, и показывают направление действия сил давления.

Если же на всём протяжении днища устраивается подъем условно горизонтальной поверхности, в том числе за счет сильного расхождения (развесистости) носовых ветвей шпангоутов (Рис. 35), то в вычислительном эксперименте следует ожидать возможности выхода корабля на глиссирование при достижении достаточно больших скоростей хода.

В проектировании обводов корабля наиболее адекватным гидродинамическим достижением следует считать исключение ходового дифференциала, в том числе на больших скоростях хода, что вполне достигается устройством клиперских скуловых обводов в оконечностях корпуса, с закручиванием набегающего потока на предельно слабо искривлённых поверхностях судовых обводов от форштевня под днище, и из под днища в сторону кормового подзора. Последнее с некоторыми оговорками относительно создания плавного потока и благоприятных условий в зоне работы рулей и движителей.

В случае вычислительных моделей конечного объёма такая относительная скорость участвует в малой интерполяционной деформации крупных частиц жидкости относительно смежных сеточных ячеек, а в случае неискажаемых трохоидальных волн аналогичные алгоритмы будут применяться к длинным аналитическим векторам скоростей волновых течений. Так, зеркальное отражение строится на разложении действующего суммарного вектора \vec{v} по компонентам ортогонального базиса с единичной нормалью \vec{n} к судовой обшивке.

Развивая численное представление физических особенностей трохоидального волнения, опираясь на локальные законы силового взаимодействия ячеек смоченной обшивки корабля с подвижными частицами забортной жидкости, классическая теория корабельного волнообразова-

ния Мичелла приводит к углублённому познанию в области штормовой гидромеханики корабля.

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

Нормальные компоненты вектора полной скорости частиц жидкости, моделирующие распределение источников для удовлетворения условий непротекания, двойным скалярным произведением скорости \vec{v} с единичной нормалью \vec{n} , определяя вектор \vec{v}_n для импульса отражаемого потока:

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

По условиям непротекания встречные потоки создают положительное давление, по аналогии с зависимостями Торричелли для давления и скорости в источнике с глубиной, с обратной стороны – в стоке давление отрицательное. Разрежение в сходящемся потоке реальной жидкости ослабляется факторами турбулентности, срывов потока или обнуляется кавитацией. В простейшем варианте можно использовать эмпирический параметр²⁷: k_v –коэффициента частичного ослабления пониженного давления в модели распределённого стока (отрицательного давления) на судо-

²⁷ В гидродинамике, в отличие от моделей гидромеханики, действие парадокса Даламбера взаимокompенсирует импульсы сил отражения и притягивания частиц жидкости.

вой обшивке. Это нарушает симметрию отражаемых и затягиваемых корпусом частиц жидкости, при обтекании корпуса корабля набегающим потоком с быстрыми пульсирующими течениями под склонами морских волн, с искусственным нарушением парадокса Даламбера по выравниванию давлений.

Асимметрия отражённых импульсов: $v_n^{\leftarrow} \times = 1 + (1 - k_v) \cdot n_v$, где k_v – фактор турбулентного разрежения для распределенных стоков в модели непротекания. Здесь n_v – скалярное произведение нормали с единичным вектором скорости внешнего потока жидкости.

Если $k_v = 0$ – полное гашение нормальной составляющей потока для притягиваемых к корпусу частиц жидкости (стоку), разрежение на скошенных фрагментах обшивки – ослабляется частично.

Если $k_v = 1$, то гидродинамические поправки не включаются, в условиях непротекания на бортовой обшивке действует симметричная взаимокompенсация импульсов скоростей для набегающего и отходящего от корпуса потоков жидкости, – парадокс Даламбера действует и нейтрализует силовую реакцию отражаемых от корпуса корабля частиц жидкости в полной мере.

По умолчанию в программе «Аугога» установлен коэффициент $k_v = 0,5$ для относительно плавной компенсации частичных потерь на эпюрах отрицательных давлений.

Скользящий вектор v_s^{\leftarrow} для скорости потока жидкости по поверхности судовой обшивки получается аналогичным по форме двойным векторным произведением:

$$v_s^{\leftarrow} = [n^{\leftarrow} \times v^{\leftarrow}] \times n^{\leftarrow} = v - v_n^{\leftarrow} \quad [м/с]$$

Изменяя знак (порядок) в последнем векторном произведении можно построить вектор v_{\perp}^{\leftarrow} для зеркального отражения скорости внешних пото-

ков от малых фрагментов n смоченной обшивки корпуса, востребуемые при моделировании отражения волновых потоков:

$$v_{\perp} = (n \cdot v) \cdot n + n \times [n \times v] = v_n - v_s, \quad [м/с]$$

что алгоритмически сводится к простому удвоению касательной компоненты скорости для отражаемой от корпуса волны.

Эвристические решения уместны для вычислительного эксперимента с использованием чисто математической недеформируемой моделью трохойдального морского волнения. Формально вся гидромеханика волновых потоков и обтекания корпуса корабля вполне адекватна полноценным дифференциальным решениям на основе прямого вычислительного эксперимента в рамках нестационарных моделей методов конечного объёма (крупных частиц жидкости) в нотации той же самой тензорной математики. В то же время, математическая модель недеформируемого трохойдального волнения весьма полезна для визуальной отладки и контроля корректности геометрических явлений и гидромеханических процессов, происходящих в зонах интенсивной трансформации набегающих и волновых потоков вблизи корабельной обшивки.

Если в вычислительном эксперименте не реализуется полная гидромеханическая задача, то для недеформируемого волнового поля достаточно рассмотрения скалярных распределений давлений и скоростей течений вблизи бортовой обшивки корабля, для чего вместо вышеописанных двойных скалярных и векторных произведений, достаточно их простых соотношений элементарными треугольниками бортовой обшивки.

Нормальная компонента набегающего потока отражается от расчётного элемента обшивки, что согласуется условиями непротекания. Величина вектора отражаемого внешнего потока применяется в качестве обратной зависимости для давления по аналогии с законом Торричелли, в котором гидравлический напор (давление) становится повышенным при

встречном течении и вычисляемом в скалярном произведении, и, соответственно, отрицательным при обратном течении – как бы при «отсосе жидкости» от бортовой обшивки.

$$\frac{\delta f_n^{\leftarrow}}{\rho} = \frac{\Delta p_n}{\rho} \cdot \delta s^{\leftarrow} = \frac{(\vec{n} \cdot \vec{v}_n) \cdot |\vec{n} \cdot \vec{v}_n|}{2} \delta s^{\leftarrow}, \quad [M^2/c^2]$$

где: Δp – изменение давления воды на элементе бортовой обшивки.

Для касательной компоненты течений используется выражение Бернулли для скоростного напора, отмеряемого от фиксированного давления для действующей на данный момент времени скорости хода корабля:

$$\frac{\delta f_n^{\leftarrow}}{\rho} = \frac{\Delta p_n}{\rho} \cdot \delta s^{\leftarrow} = \frac{V^2 - |\vec{n} \times \vec{v}_s|}{2} \delta s^{\leftarrow}, \quad [M^2/c^2]$$

где: V – скорость хода корабля.

И в целом:

$$\frac{\delta f_{\Delta}^{\leftarrow}}{\rho} = \frac{p_{\Delta}}{\rho} \cdot \delta s^{\leftarrow} = \left(\frac{V^2 - |\vec{n} \times \vec{v}_s|^2}{2} + \frac{\pm (\vec{n} \cdot \vec{v}_n)^2}{2} \right) \delta s^{\leftarrow}, \quad [M^2/c^2]$$

В последнем выражении двойные произведения для \vec{v}_s и \vec{v}_n упрощены, так как для оценок изменения давления в потоке жидкости требуется только величины скоростей, без задействования пространственной ориентации.

Принимая в качестве опорной скорость хода корабля \vec{V} , скользящая компонента скорости \vec{v}_s будет определять небольшое подвсплытие²⁸, которое по необходимости может быть компенсировано включением не-

²⁸ Эксперимент не подтверждает корректировку средней скорости хода для интегралов давления по Бернулли. Ожидаемый результат получается если $V_{\circ} = V$.

сколько большей скорости обтекания корпуса V_{\otimes}^{\leftarrow} в средней наиболее широкой части корпуса (в районе мидельшпангоута).

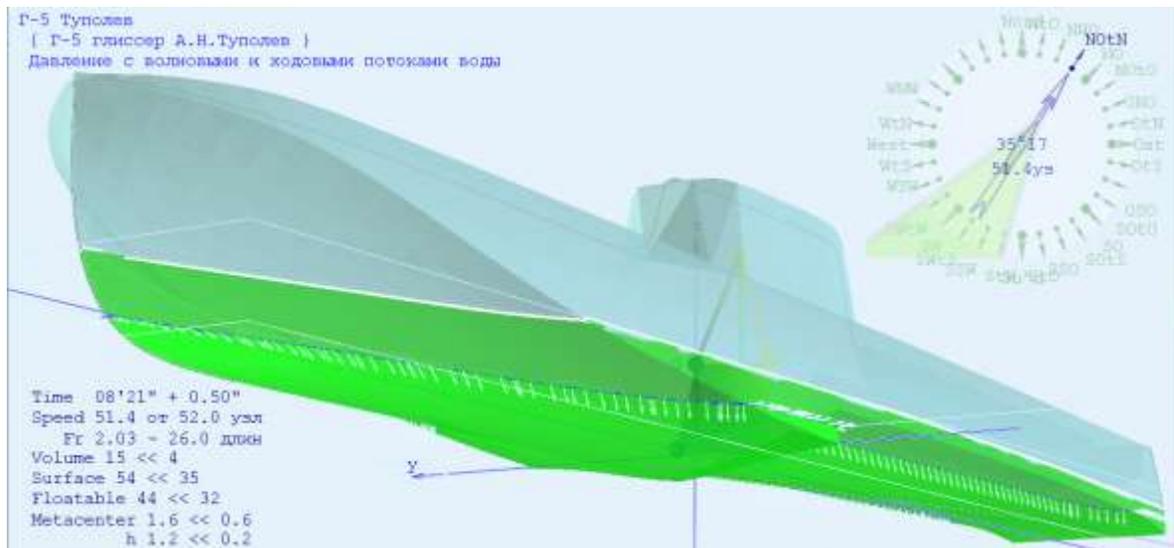


Рис. 35. *Контрольный эксперимент с быстроходным глиссирующим кораблём на тихой воде. На скорости хода 50 узлов ($Fr=2$) водоизмещение корабля уменьшается с 15 м^3 до 4 м^3 , площадь смоченной поверхности изменяется от 44 м^2 до 32 м^2 .*

Отражаемая V_n^{\leftarrow} компонента скорости непротекания создает отрицательный ходовой дифферент, с прижатием кормового подзора к поверхности воды, что создаёт условия выхода на глиссирование специально сформированных обводов корпуса.

Алгоритм с перерасчётами векторов скоростей и поправок к давлениям забортной жидкости на элементарных треугольниках судовой обшивки составляет основу прямого и расширенного моделирования воздействий на корпус встречных и волновых потоков воды. Корабельное волнообразование в вычислительном эксперименте дополняется импульсами отражения штормовых волн совместно с практической гидромеханикой силовых воздействий и реакций по ходкости и качке корабля.

Математическая модель для потоков воды особо не различается в вариантах моделирования неискажаемых трохoidalных волн или волне-

ния, свободно трансформирующегося в дифференциальных схемах конечных объёмов (*разностей*), однако, упрощенная модель служит отладке ключевых алгоритмов, и вполне приемлема для корректных экспресс оценок мореходности с помощью наблюдений за позиционированием и маневрированием корабля на интенсивном волнении в реальном времени.

Гидростатическая асимметрия объёмных интегралов на волновом склоне

Использование только объёмных интегралов сводится к наиболее устойчивым, быстрым – эффективным алгоритмам вычислительного эксперимента в штормовой гидромеханике корабля. В моделировании выполняется векторное сопоставление встречных сил и плеч их рассогласования от изменчивого водоизмещения и фиксированного гравитационного веса корпуса, Вектор архимедовых сил всплытия ориентируется направляется по интегрально осредненным градиентам волновых склонов, как по поверхностям равных давлений в пределах контура действующей ватерлинии, что формально включает в динамику движения все шесть компонент штормовой качки, с дрейфом и потерями хода.

В такой постановке недостает учёта быстроменяющегося момента инерции по объёму погруженной части корпуса. Взамен пока добавляются гидростатические силы и моменты (Рис. 36), возникающие от перепадов уровня воды по контуру действующей ватерлинии.

В алгоритме для поверхности ватерлинии выстраивается последовательность выборки по две точки a и b – вдоль ватерлинии, с третьей точкой c – на противоположном борту. В морской системе координат получится: $\delta h_y = 0,5 \cdot (a + b) \cdot z - c \cdot z$ – перепад уровней воды и бортового давления для расчётов крена и рыскания, $\delta h_x = (a - b) \cdot z$ – продольный перепад

уровней воды к расчётам килевой качки, потери хода или дельфинирования.

$$\vec{\delta f} = \rho \cdot g \cdot \{ S_x \cdot \delta h_x, S_y \cdot \delta h_y, 0 \} / 2, \quad [H, \text{кг} \cdot \text{м} / \text{сек}^2]$$

где $\vec{\delta f}$ – горизонтальный импульс силы по одному расчётному треугольнику на поверхности действующей ватерлинии в морской системе координат.

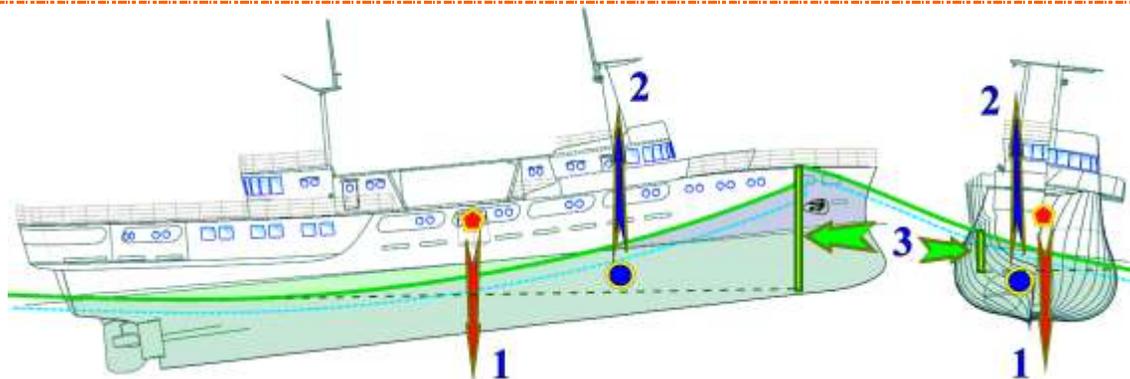


Рис. 36. Гидростатические силы на корпусе корабля в условиях штормового волнения. 1 – гравитационная масса корабля фиксируется под метacentром для заданной начальной остойчивости; 2 – гидростатическая сила плавучести создает динамическую разность с гравитационной массой, с образованием кренящего и дифференцирующего плеча; 3 – интегральный перепад уровней воды в оконечностях и по бортам корпуса (с учётом крена и дифферента), создают силы для горизонтальных смещений и поворотов корпуса относительно мгновенного центра площади действующей ватерлинии, а также пары сил с центром масс, приводящие к рысканию.

Уточняющие гидростатические моменты получаются векторным произведением с направлением на общую точку в плоскости действующей ватерлинии, к примеру, относительно центра её площади (на тихой воде):

$$\begin{aligned} \overleftarrow{\nu S} &+= \sum \overleftarrow{\delta f} && [H, \text{кг} \cdot \text{м} / \text{сек}^2] \\ \overleftarrow{\nu R} &+= \sum (\overleftarrow{r_\Delta} - \overleftarrow{G}) \times \overleftarrow{\delta f} && [H \cdot \text{м}, \text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{сек}^2] \end{aligned}$$

где $\overleftarrow{\nu S}$ – продольная и бортовая компоненты дрейфовых сил за счёт перепадов уровня моря у борта корабля; Точкой концентрации дрейфовых сил

выбирается $\overleftarrow{\nu F}$ – центр площади действующей ватерлинии. $\overleftarrow{\nu R}$ – связный вектор добавочных моментов дифферента и рыскания, обусловленных пропеллерным искривлением поверхности действующей ватерлинии (низший порядок малости).

В практике проводимых вычислительных экспериментов такая поправка на перепады давлений по действующей ватерлинии представляется незначительной, и для ускорения вычислений с целью быстрых оценок мореходности корабля не задействуется.

Алгоритмы гидромеханики качки и ходкости корабля на интенсивном волнении

Движущаяся модель корабля отдельно взаимодействует с каждым из волновых полей с predetermined фазовыми скоростями и длинами волн, что гидродинамически адекватно воссоздает геометрические трансформации и кинематические процессы отражения волн от бортовой обшивки в условно узкой полосе на действующей ватерлинии (омываемого борта корабля).

Результирующее волновое поле (Рис. 38) получается суммированием уровней моря и векторов скоростей подповерхностных течений, и формально может применяться для перерасчётов мгновенных силовых воздействий на весь корпус, включая надводный борт с перехлестом гребней волн через палубы и надстройки.

Каждый шаг корабля во времени отслеживается с помощью последовательности (массива) векторных отсчётов, которые при необходимости легко задействуются для уточнения локальных динамических параметров движения корабля:

Route – маршрут – траектория контролируемого хода корабля в глобальном морском базисе [М];

Rate – скорость движения корпуса в корабельного базисе [м/с];

Head – мгновенные значения углов крена, дифферента и рыскания в глобальном базисе [рад];

Whirl – угловые скорости качки в локальных углах Крылова в корабельном системе координат [рад/с].

Вычислительный эксперимент образуется последовательностью алгоритмов с векторными и тензорными величинами. В случае гидростатической постановки корпуса на волну, гидродинамика корабля под действием внешних сил может рассматриваться в допущениях законов о движении твердого тела. Формально это означает необходимость вычисления только суммарного вектора сил и точки его приложения.

Для случая пространственных гидростатических вычислений это объём за смоченной обшивкой корпуса с точкой концентрации архимедовой силы плавучести в мгновенном центре величины. В качестве вектора всплытия он направляется по нормали к осредненной поверхности волнового склона, рассекаемого корпусом корабля:

$$\overleftarrow{B} = iV \cdot \overleftarrow{v}W. \quad [M^3]$$

Вертикальный вектор гравитационной массы/объёма корпуса синтезируется в глобальной системе координат:

$$\overrightarrow{W} = \{0,0,Volume\}. \quad [M^3]$$

Изменение скорости поступательных перемещений корпуса в корабельной системе координат, без учёта ослабления при действии вращательного момента с плечом рассогласования центров величины и массовой тяжести корабля:

$$\overleftarrow{V} += g \cdot (\overleftarrow{B} + \overrightarrow{W} / \mathbf{r}) \cdot \delta t / Volume, \quad [M/c]$$

где: g – ускорение свободного падения; деление на корабельный базис \mathbf{r} означает перевод вектора из глобальной морской системы координат к локальному корабельному базису.

Демпфирование инерционных сил и моментов по штормовой качке и дрейфу корпуса

Дифференциальное уравнение малых свободных колебаний корпуса включает инерционные и демпфирующие компоненты для восстанавливающих и дрейфовых сил и моментов в локальной системе координат [10, 1985, Войткунский]. Выражения с собственными колебательными движениями под действием восстанавливающих реакций записываются для ϑ – бортовой, ψ – килевой и ζ – вертикальной качки:

$$\begin{aligned} (I_{xx} + \lambda_{44}) \cdot \ddot{\vartheta} + \mu_{44} \cdot \dot{\vartheta} + g \cdot M \cdot h_0 \cdot \vartheta &= 0, & [\text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2] \\ (I_{yy} + \lambda_{55}) \cdot \ddot{\psi} + \mu_{55} \cdot \dot{\psi} + g \cdot M \cdot H_0 \cdot \psi &= 0, & [\text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2] \\ (M + \lambda_{33}) \cdot \ddot{\zeta}_g + \mu_{33} \cdot \dot{\zeta} + g \cdot \rho \cdot S \cdot \zeta_g &= 0, & [\text{кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2] \end{aligned}$$

или при формализации канонической записи:

$$\begin{aligned} \ddot{\vartheta} + 2 \cdot \nu_{\vartheta} \cdot \dot{\vartheta} + \omega_{\vartheta}^2 \cdot \vartheta &= 0, & [\text{рад} / \text{с}^2] \\ \ddot{\psi} + 2 \cdot \nu_{\psi} \cdot \dot{\psi} + \omega_{\psi}^2 \cdot \psi &= 0, & [\text{рад} / \text{с}^2] \\ \ddot{\zeta}_g + 2 \cdot \nu_{\zeta} \cdot \dot{\zeta} + \omega_{\zeta}^2 \cdot \zeta_g &= 0. & [\text{м} / \text{с}^2] \end{aligned}$$

Приведенные выражения создают основу описания затухающих гармонических колебаний для угловой (ϑ - бортовой и ψ - килевой) и поступательной (ζ - вертикальной) качки корпуса.

Относительные коэффициенты демпфирования бортовой, килевой и вертикальной качки:

$$\nu_{\vartheta} = \frac{\mu_{44}}{2 \cdot (I_{xx} + \lambda_{44})}, \quad \nu_{\psi} = \frac{\mu_{55}}{2 \cdot (I_{yy} + \lambda_{55})}, \quad \nu_{\zeta} = \frac{\mu_{33}}{2 \cdot (M + \lambda_{33})} \quad [\text{с}^{-1}]$$

Собственные круговые частоты бортовой и вертикальной качки инерционного характера:

$$\omega_g = \sqrt{g \cdot M \cdot h_0 / (I_{xx} + \lambda_{44})} \quad \text{и} \quad \omega_\zeta = \sqrt{g \cdot \rho \cdot S / (M + \lambda_{33})} \quad \text{..} [c^{-1}]$$

Эмпирические или сокращённые выражения для собственных колебаний корпуса записываются относительно периодов качки $\tau = 2\pi/\omega$ [сек], как капитанская формула: $\tau_g = k \cdot B / \sqrt{h_0}$ [сек] с коэффициентом $k \approx 0,78$ [с/м^{1/2}] для малых и средних судов, до его величины $k \approx 0,9$ [с/м^{1/2}] для крупных судов или транспортов с полным грузом. Аналогичная оценка собственного периода для вертикальной качки: $\tau_\zeta = 2,5 \cdot \sqrt{T}$ [сек], и также по килевой качке $\tau_\psi = 2,4 \cdot \sqrt{T}$ [сек]: где: T [м] – осадка; B [м] – ширина корпуса по действующей ватерлинии; S [м²] – площадь действующей ватерлинии; h_0 [м] – метацентрическая высота; $M = \rho \cdot W$ [кг] – масса корпуса; $D = \rho \cdot g \cdot W$ [кг·м/с²] – гравитационная сила тяжести корпуса; W [м³] – объёмное водоизмещение; $\gamma = \rho \cdot g = 1025$ [кг/м²/с²] – массовая плотность воды; μ_g [кг·м²/с] – обобщенный коэффициент демпфирования угловой скорости и μ_ζ [кг/с] – в случае со скоростью поступательной.

Во всех трёх дифференциальных уравнениях движения присутствует восстанавливающие моменты ω_g , ω_ψ и силы ω_ζ с инерционной нормировкой, которые $\omega^2 \gg \nu^2$ значительно превышают демпфирующие компоненты в дискриминанте характеристического уравнения $\sqrt{\nu^2 - \omega^2} \approx i \cdot \omega$, что соответствует решениям с осциллирующими свойствами для собственных периодов малых колебаний корпуса, без начальной угловой скорости.

$$\vartheta = \vartheta_0 \cdot e^{-\nu_g \cdot t} \cdot \cos \omega_g t \quad \text{– бортовая качка,} \quad [рад]$$

$$\psi = \psi_0 \cdot e^{-\nu_\psi \cdot t} \cdot \cos \omega_\psi t \quad \text{– килевая качка,} \quad [рад]$$

$$\zeta = \zeta_0 \cdot e^{-\nu_\zeta \cdot t} \cdot \cos \omega_\zeta t \quad \text{– вертикальная.} \quad [рад]$$

Полученные решения дифференциальных уравнений второго порядка, с восстанавливающими исходное положение и демпфирующими скорость движения компонентами, могут и должны быть использованы для проверки результатов вычислительного эксперимента в условиях малых свободных и затухающих колебаниях корпуса корабля на тихой воде.

В условиях интенсивного морского волнения собственные колебания корпуса, исчисляемые по начальным метацентрическим зависимостям, сами по себе должны считаться несущественными в сравнении с воздействием крутых склонов крупных морских волн с непредсказуемой периодичностью. В прямом вычислительном эксперименте такое гидростатическое воздействие оценивается значительно более точными геометрическими алгоритмами, с естественным совмещением не меньших гидродинамических эффектов, с большими углами и быстрыми вертикальными смещениями уровня моря под внешним штормовым воздействием сколь угодно большой интенсивности.

Три компоненты качки: χ – рыскания; η – поперечных колебаний и ξ – продольных пульсаций скорости хода.

$$(I_{zz} + \lambda_{66}) \cdot \ddot{\chi} + \mu_{66} \cdot \dot{\chi} = 0, \quad [\text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2]$$

$$(M + \lambda_{11}) \cdot \ddot{\xi} + \mu_{11} \cdot (\dot{\xi} - \dot{\xi}_i) = 0, \quad (M + \lambda_{22}) \cdot \ddot{\eta} + \mu_{22} \cdot \dot{\eta} = 0, \quad [\text{кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2]$$

и три канонические формы этих угасающих движений:

$$\ddot{\chi} + 2 \cdot \nu_{\chi} \cdot \dot{\chi} = 0, \quad [\text{рад} / \text{с}^2]; \quad \ddot{\xi} + 2 \cdot \nu_{\xi} \cdot \Delta \dot{\xi} = 0, \quad \ddot{\eta} + 2 \cdot \nu_{\eta} \cdot \dot{\eta} = 0, \quad [\text{м} / \text{с}^2]$$

где: $\dot{\xi}_i$ – скорость хода по индикаторной (эффективной) мощности двигателей на тихой воде, $\Delta \dot{\xi} = \dot{\xi} - \dot{\xi}_i$ – отклонения скорости хода относительно ходкости на тихой воде.

В дискриминанте канонического уравнения движения остается только положительная величина демпфирования $\sqrt{\nu^2} = |\nu|$, значит, фундаментальное решение в целом сводится к затухающим колебаниям угловых

и поступательных скоростей движения корпуса, что в локальных координатах справедливо для всех шести компонент моделируемого движения.

$${}^+ \xi += \dot{\xi}_i \cdot \delta t + \frac{\Delta \dot{\xi}}{2v_\xi} \left(1 - e^{-2v_\xi \cdot \delta t}\right), \quad [м]$$

$${}^+ \eta += \frac{\dot{\eta}}{2v_\eta} \left(1 - e^{-2v_\eta \cdot \delta t}\right), \quad {}^+ \zeta += \frac{\dot{\zeta}}{2v_\zeta} \left(1 - e^{-2v_\zeta \cdot \delta t}\right), \quad [м]$$

где: δt – расчётный интервал времени одного шага вычислительного эксперимента, ${}^+ \xi$, ${}^+ \eta$ и ${}^+ \zeta$ – местоположение центра масс корабля по истечении расчётного интервала времени δt .

$${}^+ \vartheta += \frac{\dot{\vartheta}}{2v_\vartheta} \left(1 - e^{-2v_\vartheta \cdot \delta t}\right) - \text{крен}, \quad [рад]$$

$${}^+ \psi += \frac{\dot{\psi}}{2v_\psi} \left(1 - e^{-2v_\psi \cdot \delta t}\right) - \text{дифферент}, \quad [рад]$$

$${}^+ \chi += \frac{\dot{\chi}}{2v_\chi} \left(1 - e^{-2v_\chi \cdot \delta t}\right) - \text{рыскание}. \quad [рад]$$

Такое подтормаживание угловых и поступательных скоростей удовлетворяет базовым дифференциальным уравнениям движения, которые применимы исключительно и только в случае слабых колебаний с малыми отклонениями от исходного положения корпуса корабля на тихой воде. Тем не менее, несмотря на формально малые скорости колебательных движений, присоединенные массы окружающей воды и вязкие срывы потоков на выступающих частях корпуса, оправдывают применение адаптивных эмпирических моделей качки более высокого второго или третьего порядка воздействия на скорости вынужденных движений корпуса корабля на волнении.

Гидромеханическим парадоксом в качке корабля можно называть обратное действие вязкости жидкости на усиление внешних сил и моментов. В штормовом море именно скоростные потоки в толще воды под гребня-

ми волн создают внешнее силовое воздействие на раскачивание корабля, которое усиливается наличием любых выступающих частей: как днищевых и бортовых килей, крыльевых успокоителей качки; так же как и дейдвудных кронштейнов, рулей, плавникового ахтерштевня или широкого транца над кормовым подзором вместо округлой крейсерской раковины, и других выступающих частей.

Поэтому целесообразно оставить линейные зависимости демпфирования качки только для малых, начальных поступательных и угловых скоростей. При значительном увеличении скоростей качки пусть включается кубическое гашение скоростей с двукратным пределом.

$$V_{\times} = \left(1 - 0.5 \cdot \tanh(\mu \cdot V^2 \cdot \delta t) \right) \frac{(1 - \exp(-\mu \cdot \delta t))}{\mu},$$

где V – условная скорость качки; μ – фактор демпфирования; δt – расчетный шаг времени.

Весьма сложной и неразрешимой проблемой в построении прямого вычислительного эксперимента представляется включение касательных напряжений от вязкости жидкости на элементарных расчётных площадках корабельной обшивки. Фрагменты смоченной бортовой обшивки участвуют в собственном движении, и подвержены влиянию интенсивных внешних потоков под гребнями морских волн.

Алгоритмы моделей движения и демпфирования колебаний корпуса

Фактор демпфирования скорости μ связан с величиной отклонений скорости от установившейся или нейтральной величины, и формально учитывает влияние гидродинамически необратимых процессов, присоединенных масс и вязкости жидкости.

$${}^{\leftarrow}V \&= {}^{\leftrightarrow}damp,$$

[м/с]

здесь операция $\&=$ означает покомпонентное умножение величин скорости на соответствующие безразмерные параметры демпфирования: $damp$ – зависящего от фактора демпфирования и шага вычислительного эксперимента во времени:

$$damp = \frac{1 - e^{-2\nu \cdot \delta t}}{2\nu \cdot \delta t}.$$

Демпфирование бортовой качки усиливается на больших угла крена, так при моделировании опрокидывания фактор демпфирования параболически возрастает в четыре раза.

$$damp_{\xi} = (1,0 - 0,5625 \cdot \vartheta / \pi)^2,$$

где ϑ – угол крена в радианах.

В моделировании поступательных движений корабля также применяются полные значения скорости для центра масс корпуса, с простым исключением маршевого хода под тягой судовых машин без внесения дополнительных нелинейных поправок:

$$\dot{\xi} = \dot{\xi}_i - \dot{\xi}_0 = \dot{\xi}_i - Speed.$$

Факторы демпфирования могут интерактивно изменяться в процессе вычислительного эксперимента. В начальных условиях инициализируются числовыми векторами, как:

$v_{\xi, \eta, \zeta} = \{ 0.05, 0.4, 0.3 \}$ – продольной, поперечной и вертикальной качки;

$v_{\vartheta, \psi, \chi} = \{ 0.1, 0.3, 0.4 \}$ – для бортовой, килевой качки и рыскания.

В составе моделирующих алгоритмов:

$\mu F = \{ 0.1, 0.8, 0.6 \}$ – продольной, поперечной и вертикальной качки

$\mu M = \{ 0.2, 0.6, 0.8 \}$ – для бортовой, килевой качки и рыскания.

Для перехода к относительным коэффициентам демпфирования в инерционной нормировке не включаются в явной форме присоединённые

массы для неустановившихся режимов обтекания корпуса. В процессе интенсивной штормовой качки значительно изменяется площадь смоченной обшивки, вплоть до отрыва корпуса поверхности моря при слеминге, и до полного погружения под воду и с перехлёстами верхних палуб гребнями волн. В силу проводимого учёта скоростей потоков с гидромеханикой изменения давлений вблизи поверхности корпуса, необходимость или возможность вовлечения эффектов присоединенных масс в таких условиях требует дополнительных исследований и практических обоснований.

Отметим также, что полные уравнения движения моделируют движение корабля в целом, а не только его затухающие колебания под внешним волновым воздействием, и где задействуются тензоры инерции для взаимосвязанных поступательных и угловых движений, потому в промежуточном алгоритме с коэффициентами демпфирования инерционная нормировка считается преждевременной:

$$V_{\xi,\eta,\zeta} = \frac{\mu_{\xi,\eta,\zeta}}{2 \cdot M} \Rightarrow \frac{\mu_{\xi,\eta,\zeta}}{2}; \quad [m^3/c]$$

$$V_{\vartheta,\psi,\chi} = \frac{\mu_{\vartheta,\psi,\chi}}{2 \cdot I_{44,55,66}} \Rightarrow \frac{\mu_{\vartheta,\psi,\chi}}{2} \quad [m^5/c]$$

Факторы демпфирования, также как и основные уравнения движения, могут применяться без множителя с плотностью жидкости, что изначально принято в реализации вычислительных экспериментов «Aurora». В алгоритмах с оценками собственных угловых и поступательных колебаний корпуса потребуются вернуть инерционные параметры в размерном виде, и применять модели с радикалами для плотности жидкости.

Для продольных пульсаций скорости хода демпфируется только различие текущей скорости $V.x$ от заданной $Speed$, как бы по условиям тяги двигателей на тихой воде.

Скорость поступательных движений корпуса измеряется в корабельной системе отсчёта, что требуется для динамической синхронизации хода и тяги маршевых двигателей:

$$Speed = V.x. \quad [м/с]$$

В случае прекращения тяги двигателей, коэффициент демпфирования применяется непосредственно к величине скорости хода:

$$Speed \times = dumpF.x. \quad [м/с]$$

Во избежание некорректного подтормаживания в маршрутном массиве скоростей продольный компонент обнуляется и не влияет на регулирование скорости хода²⁹.

$${}^{+}Rate = \{0, \overset{\leftarrow}{V}_y, \overset{\leftarrow}{V}_z\}, \quad [м/с]$$

где (+) верхний левый индекс отмечает новый шаг во времени, следующий элемент в массиве скоростей.

Согласованный таким образом свободный вектор локальной скорости переводится в глобальную систему координат и задействуется в расчёте местоположения корабля на следующий момент времени:

$${}^{+}Route += \vec{r} \cdot \overset{\times}{V} \cdot \overset{\leftarrow}{\delta t}, \quad [м]$$

и вычисленная компонента вертикальной качки переносится в корабельный базис: $r.Z = Route.z$, где прописная Z отмечает аппликату центра масс в глобальной системе координат (*строчная z – локальная аппликата*).

Разделенный этап моделирования угловых моментов сил и вращательный реакций корпуса предварительно строится в предположении фиксированного центра масс корабля, относительно которого моделируется динамика крена, дифферента и рыскания. Возможно, что это не-

²⁹ Нотация обозначений в пространстве и времени из тензорной математики [16. Тензорная,.. 2005].

сколько усиливает как поступательные, так и вращательные движения корабля на штормовом волнении, однако соответствует правилу привносимых погрешностей в сторону большей «опасности».

Плечо момента архимедовых сил всплытия в корабельном базисе:

$$\overleftarrow{R} = v\overleftarrow{B} - \overleftarrow{Gravity} \quad [M]$$

Образуется импульс момента проворачивающих сил за время δt , также в корабельном базисе:

$$\overleftarrow{M} = g \cdot (\overleftarrow{R} \times \overleftarrow{B}) \cdot \delta t \quad [M^5/c]$$

Любое ускорение центра масс корабля откликается моментам сил относительно условного центра бокового сопротивления корпуса на воде (пусть им будет тот же центр величины). Требуемое ускорение проще получить численно дифференцированием маршрута движения корабля с приведением к корабельному базису:

$$\overleftarrow{M} += \overleftarrow{R} \times [(\overrightarrow{-1Route} - 2 \cdot \overrightarrow{-2Route} + \overrightarrow{-3Route}) / \mathbf{r}] \cdot Volume / \delta t \quad [M^5/c]$$

Обновленный вектор угловой скорости на качке корабля также определяется в локальном корабельном базисе:

$$\overleftarrow{\Omega} += \overleftarrow{M} \cdot \delta t / \mathbf{inMass} \times, \quad [рад/c]$$

после применения демпфирования к компонентам угловых скоростей:

$$\overleftarrow{\Omega} \&= dumpM, \quad [рад/c]$$

начальные величины устанавливаются как: $M = \{ 0.9; 0.8; 0.7 \}$, можно определиться с текущими углами крена, дифферента и рыскания:

$$\overleftarrow{K} += \overleftarrow{\Omega} \cdot \delta t. \quad [рад]$$

В вычислительном эксперименте может проявляться эффект цифрового демпфирования с усилением внешнего силового воздействия, когда

под воздействием крупного волнения могут появляться неадекватно большие ускорения по всем шести компонентам качки. В частности, представляется полезным ограничение угловой скорости опрокидывания корабля величиной времени не более 6 секунд, что полезно в плане исключения необоснованно больших линейных ускорений, возникающих от запаздывающего интервала отсчётов времени в интегралах движения по линейным дифференциалам Эйлера.

$$|\dot{\Omega}^{\leftarrow}|_x \leq \pi / 6$$

[рад/с]

Полагая, что килевая качка и рыскание не подвержены резонансным эффектам под ударами гребней регулярного волнения, такие ограничения угловых скоростей не вводятся.

Форма цифровой модели корпуса корабля в надводной части может иметь большие плоскости и возвышенные надстройки, на которых концентрируются ударные гидродинамические нагрузки в случае большого угла крена и в моменты опрокидывания корпуса. Для поддержания устойчивости вычислительного процесса скорость накренения искусственно ограничивается так, чтобы опрокидывание происходило не быстрее чем за 10 секунд. Одновременно вчетверо усиливается фактор демпфирования бортовой качки для положения корпуса кверху килем:

$${}^+ \dot{\vartheta} \times = 1 - (0,5625 \cdot \vartheta / \pi)^2.$$

В построении вычислительного эксперимента используются углы Крылова (Эйлера) для которых характерно наличие критического направления, которое в расчетах обуславливается достижением вертикального дифферента для корпуса корабля. Во избежание разрывных геометрических решений величина дифферента ограничивается искусственно до 84°.

Свободный вектор результирующей гидродинамической силы \vec{vS} [Н/ρ] и вектор углового момента для погруженной в воду части корпу-

са vR [Н·м/ρ] вычисляются в корабельной (локальной) системе отсчёта строго относительно центра масс корабля G .

В такой модели гидромеханики частицы жидкости оказывают непосредственное силовое воздействие на смоченную обшивку корабля, в исключительно переменчивом пространственном распределении гидростатических и гидродинамических давлений, в том числе с учётом интенсивной кинематики поступательных и угловых движений собственно корабля на интенсивном волнении.

С принятыми допущениями по скорости набегающих ходовых и волновых потоков воды вокруг корпуса корабля, характер течений изменяется по условиям непротекания в неискажаемой суперпозиции с потоками под склонами и гребнями волновых полей. При этом набегающий поток учитывается исходя из условий непротекания судовой обшивки, в то время как скорости волновых трохоидальных течений – динамически отражаются.

По теории, динамический центр вращения корпуса (аналог ЦБС=*Pivot Point*) отсчитывается относительно центра тяжести корпуса (ЦТ=*CoG-gravity*) со значительным по величине смещением для учета влияния присоединенных масс жидкости относительно центра величины (ЦВ=*CoV-buoyancy*) подводного объема, и действующего на данный момент перераспределения давлений в скоростном потоке на смоченной поверхности корпуса (ЦД=*CoL-lift*), с небольшими поправками по разбалансировке центра сопротивления движению с местоположением линии и направления тяги винто-рулевого комплекса (*CoT-thrust*).

Изначально центр плавучести (ЦВ) устанавливается строго относительно погруженной части корпуса на тихой воде. Затем, в процессе вычислительного эксперимента, включается суперпозиция с пульсациями давлений под гребнями штормовых волн и гидродинамическое перераспределение давлений воды при моделировании обтекания по ходу с учё-

том отражения волновых потоков от корпуса корабля. Уточненный таким образом центр давлений (ЦД) участвует в синхронизации движений корабля в окружающих потоках воды, связывая центры внешних угловых воздействий с поступательными смещениями в быстрых потоках трюхoidalных волн.

Асимметрия силовых воздействий для отрицательных и положительных распределений давления воды контролируется параметром Kv , и таким образом уточняются дрейфовые сдвиги со смещением центра бокового сопротивления ЦБС по направлению движения в зависимости от величины скорости хода корабля.

В рабочих алгоритмах двойные произведения для \vec{v}_s и \vec{v}_n упрощаются, так как в оценках изменения давления в потоке жидкости требуются только величины скоростей, без включения в расчеты их пространственной ориентации.

В морской (глобальной) системе координат вектор гидродинамической силы будет создавать дополнительный момент относительно центра силовой реакции корпуса M :

$$\vec{v}S = \mathbf{r} \cdot \vec{v}S, \quad [M]$$

$$\vec{v}R = \mathbf{r} \cdot (\vec{v}R + \vec{v}S \times M), \quad [кг \cdot м]$$

где $M = f(G, C, F, \mu)$ – подвижный центр силовой реакции корпуса в условиях изменчивого водоизмещения при движении на штормовом волнении, зависящий от местоположения центра масс G и центральной оси, текущих координат действующего водоизмещения C , центра площади ватерлинии и действия присоединенных масс жидкости μ , формально связанных с параметрами демпфирования поступательных скоростей движения корпуса.

Изначально в качестве центра инерции принимается центр масс корабля, что позволяет корректно обрабатывать полный выход корпуса из воды в условиях интенсивной вертикальной качки.

В нормальном водоизмещающем состоянии к вектору центра масс привносится смещение к точке привязки действующего углового момента, что делает главный вектор сил скользящим по центральной оси:

$$\overleftarrow{vD} = \overleftarrow{G} + [\overleftarrow{vS} \times \overleftarrow{vR}] / |\overleftarrow{vR}|^2 \quad [M]$$

Другая контрольная точка задает центр силового сопротивления корпуса с учётом присоединенных масс воды, которая получается пространственным усреднением между центром величины с весовым множителем водоизмещением, и мгновенным центром площади ватерлинии, с объёмным множителем в качестве вертикального отстояния центра площади ватерлинии от центра величины в глобальной морской системе отсчета.

$$\overleftarrow{dV} = (\overleftarrow{vF} (iF \cdot dZ) + \overleftarrow{vB} \cdot iV) / (iF \cdot dZ + iV) \quad [M]$$

где: dV – подводный центр бокового сопротивления; vF – центр площади ватерлинии; iF – площадь ватерлинии; dZ – вертикальное отстояние центра площади ватерлинии от центра величины; vB – координаты центра величины; iV – водоизмещение. Все величины, кроме dZ , измеряются в корабельном базисе на расчётный момент времени в произвольном положении корабля относительно взволнованной поверхности моря, – по текущей смоченной поверхности корпуса.

Динамический центр устанавливается на линии между центрами vD и dV в пропорциях относительно факторов поступательного демпфирования (присоединенных масс), с нормировкой до единицы с помощью поэлементной операции:

$$\overrightarrow{vC} = \overleftarrow{dV} \cdot \tanh \mu + \overleftarrow{vD} \cdot (1 - \tanh \mu), \quad [M]$$

где параметр $\mu F(\xi, \eta, \zeta)$ используется без преобразований, так, как он указывается в исходных данных эксперимента. Таким образом, если $\mu F = 0$ отсутствует, то движение корпуса корабля осуществляется относительно центра масс G , если $\mu F \approx 0,55$, то динамический центр будет приводиться к середине между центрами тяжести и присоединенных масс, и при увеличении $\mu F > 1$ - центр движения корабля будет приближаться к подводному центру бокового сопротивления νC . Регулирование центральной оси движения корабля выполняется независимо по каждому направлению $\mu F(\xi, \eta, \zeta)$ – ходкости, боковой и вертикальной качке.

Новые координаты точки отсчёта движения корабля на новый момент времени будут получены с учётом поступательного движения с поворотом вокруг центральной оси с угловой скоростью ω , проходящей через точку νC :

$$\overset{\rightarrow}{Locate} = \overset{\times}{\mathbf{r}} \cdot (\overset{\leftarrow}{V} + \overset{\leftarrow}{\nu C} \times \overset{\leftarrow}{\omega}) \cdot \delta t, \quad [M]$$

где \mathbf{r} – тензор локального базиса корабля; V – текущая скорость хода; ω – скорость вращательного движения корпуса.

Автоматическое регулирование и адаптивное управление курсом и скоростью хода

Важной функцией вычислительного эксперимента является плавное регулирование набора скорости хода, а также ограничение скорости циркуляции при выходе на заданный курс, при которых не ограничивается свободная динамика ходкости и рыскание на курсе под воздействием штормового волнения.

В вычислительном эксперименте вышеописанная операция линейного демпфирования вполне адекватно задействуется для небольших откло-

нений от заданной ходкости на спокойной воде $\dot{\xi}_i$ для моделируемых условий штормового плавания.

Ускоренное приведение к заданной скорости формально предопределяется условной мощностью двигателей, и особо не влияет на её малые пульсации при небольшом усилении фактора демпфирования:

$$+\dot{\xi} /= (1 - \tanh^2(\dot{\xi}_i - \dot{\xi}) / 16) / 24.$$

времени с полной циркуляцией за 4, 2 или одну минуту.

Управление курсом корабля выполняется малыми приращениями угла направления $\delta\chi$, которые на тихой воде обеспечивают полную циркуляцию в одном из трёх режимов: «Руль на борт» – за 1 минуты; «Полборта» – 2 минуты; и «Помалу» – за 4 минуты.

В штормовом плавании режим «Помалу» включается автоматически при отклонении от заданного курса на 1 румб ($11^\circ 15'$), однако это может быть недостаточно для возвращения корабля на заданный курс.

Для ускорения циркуляции и выхода на заданный курс можно задействовать ручное управление с выбором режимов «Руль на борт» или «Полборта»:

$$+K.z += \min\max(-\delta A, \delta K.z, \delta A),$$

где: $\delta A = \delta t \cdot (\pi / 120, \pi / 60$ или $\pi / 30)$ – угол изменения курса за один шаг.

После выхода корабля на указанный курс руль автоматически ставится прямо, с повторением автоматического управления с переключками руля «Помалу».

На крупной волне скорости циркуляции может быть недостаточно, и модель рискует встать лагом к волне, или перейти к дельфинированию и опасному брочингу (в текущей версии пока не оценивается обратное действие руля под обгоняющим потоком в гребне штормовой волны).

Управление ходом с помощью тяги двигателя и плавное регулирование курса позволяют моделировать возникновение крена на циркуляции с адекватным ходовым дифферентом при разгоне и торможении; с проявлением потерь хода на штормовом волнении и других эффекты качки и ходкости по всем шести степеням свободного маневрирования корабля.

При подаче команды на поддержание заданной скорости хода включается ограничение ускорения с помощью эмпирической константы 0,03, приведенной к требуемой физической размерности с помощью нормировки площади смоченной поверхности корпуса $Surface$ к исходному водоизмещению $Volume$:

$$\overset{\rightarrow}{+}V += 0,03 \cdot \overset{\rightarrow}{\delta}V \cdot |\overset{\rightarrow}{\delta}V| \cdot \delta t \cdot Surface / Volume,$$

где δV – разность между заданной и текущей скоростью хода, δt – интервал одного расчётного такта во времени.

Демпфирование продольной качки применяется к разнице между заданной и текущей скоростью хода δV , что также способствует плавному регулированию ходкости, допуская дельфинирование и существенных потери хода, вплоть до обратного дрейфа, характерного для реальных условий штормования корабля на курсе «носом на волну».

Изменение курса также выполняется с должным одерживанием в трёх режимах циркуляции как: «помалу», «полборта» и «на борт»:

$$\overset{+}{K.z} += \min\max(-\delta A, \delta K.z, \delta A),$$

где: $\delta A = \delta t \cdot (\pi / 120, \pi / 60$ или $\pi / 30)$ – угол изменения курса за один шаг времени с полной циркуляцией за 4, 2 или одну минуту.

Автоматическое регулирование возвращения на заданный курс осуществляется при отклонении на величину 0,1 радиана ($\approx 5^\circ 43'$), с установкой угловой скорости «по малу»: $\Omega.z = \pi / 120$ [рад/с] (полный круг за 4 минуты). На крупной волне такой скорости может быть недостаточно и

рыскание легко превышает критические углы, характерные выхода лагом к волне, или для захвата корпуса с опасным брочингом. В вариантах интерактивного управления скорость циркуляции может выбираться как «полборта»: $\Omega.z = \pi/60$ [рад/с] (≈ 2 мин.), или «руль на борт»: $\Omega.z = \pi/30$ [рад/с] (≈ 1 мин.), что вполне достаточно для ускоренного восстановления выбранного курса.

Управление ходом с помощью тяги двигателя и плавное регулирование курса позволяют моделировать возникновение крена на циркуляции с адекватным ходовым дифферентом при разгоне и торможении; а также проявление потерь хода на штормовом волнении; дельфинирование при захвате корпуса попутной волной и другие эффекты качки и ходкости по всем шести степеням свободного маневрирования корабля.

Вычислительная модель групповых структур морского волнения

Корабельная гидромеханика и волновые процессы на поверхности глубокого моря не изобилуют разнообразием геометрических форм или множественностью физических проявлений ветрового морского волнения и затухающей зыби. Силовое взаимодействия корабля, океана и атмосферы связаны законами неразрывности тяжелой жидкости, условиями сохранения и равномерного распределения энергии гравитационных волн, возбуждаемых ветровыми напряжениями на водной поверхности.

Основные зависимости и обозначения из теории волн

$\tau = 2\pi / \omega$ [с] – текущий период волны;

$\lambda = 2\pi / k$ [м] – видимая длина волны;

$\rho = 1025$ [кг/м³] – плотность жидкости;

g – гравитационное ускорение [м/с²];

$\sigma = 0,072.86$ [кг/с²] – коэффициент капиллярного натяжения на поверхности воды при температуре 20°C;

$C_w = \lambda / \tau = \omega / k$ [м/с] – фазовая скорость в длинах и частотах волны;

$C_w = \sqrt{g/k} = \sqrt{g \cdot \lambda / 2\pi}$ – фазовая скорость волны на глубокой воде;

$C_w = \sqrt{\sigma \cdot k / \rho}$ – капиллярной: $C_{cg} = 0,232$ м/с; $\lambda_{cg} \approx 1,73$ см { $g/k \Leftrightarrow \sigma \cdot k / \rho$ }

$C_w = \sqrt{g \cdot H}$ – скорость длинной волны (мелкая вода), H [м] – глубина;

$C_w = \sqrt{\left(\frac{g}{k} + \frac{\sigma}{\rho} \cdot k\right) \cdot \text{th}(k \cdot H)} = \sqrt{\left(\frac{g \cdot \lambda}{2\pi} + \frac{2\pi \cdot \sigma}{\rho \cdot \lambda}\right) \cdot \text{th} \frac{2\pi \cdot H}{\lambda}}$ – скорость гравитационной волны с учётом реологических факторов состояния жидкости:

λ [м] – длина волны, σ [кг/с²] – поверхностное натяжение и H [м] – глубина моря;

r_w [м] – локальный радиус трохойды в волновых движениях жидкости;

$r_z = r_w \cdot e^{k \cdot z} = r_w \cdot e^{2\pi z / \lambda}$ – радиус трохойды, z [м] $\in [0 \div -\infty$ [– глубина;

$\varphi_w = 2\pi \cdot (s + t \cdot C_w) / \lambda_w$ – отсчёт фазового угла для трохойдальной волны,

s [м] – отстояние, t [с] – отсчёты времени при скорости C_w [м/с]; \leftrightarrow

$\omega = 2\pi \cdot C_w / \lambda = 2\pi / \tau = \sqrt{g \cdot 2\pi / \lambda}$ [1/с] – круговая частота;

ζ [м] – смещение частицы в вертикальной плоскости по ходу волны;

$v_z = \omega \times r_z$ [м/с] – скорость на трохойдальной траектории с глубиной z ;

$h = 2 \cdot r_w$ [м] – условная высота волны как удвоенный радиус трохойды;

$H_w = 8/3 \cdot \pi \cdot h / \lambda$ – коэффициент высоты экстремального гребня волны.

В основе вычислительных моделей штормового моря используются теоретические результаты и вычислительные модели для трохойдальных волн большой высоты [17, Поисковые..., 2018], в которых параметрическая запись кинематики частиц жидкости по аргументу времени представляется кинематическими траекториями в сплошной среде в силовом гравитационном поле морского волнообразования, распространения и трансформации групповых структур и волновых пакетов. В вычислительном эксперименте задействуется поверочный вариант чисто математического

описания нестационарных трохоидальных волновых пространств строго аналитической форме, а также моделирование трохоидального волнения с помощью дифференциально-разностных алгоритмов для представления физических процессов внутри и в окрестности элементарных частиц жидкости в формализациях тензорной математики [16, Тензорная математика..., 2005] для вычислительных экспериментов в гидромеханике.

Волновые пакеты и их групповые структуры для опытов с надводным кораблём воссоздаются сообразно наблюдениями за реальным штормовым волнением на море, которое представляется ячеистым распределением троек волн с девятью валами различной высоты, в том числе с обрушающимися гребнями, и с удлинением протяженности выполаживаемых волновых фронтов в случае уменьшения крутизны их центральных валов.

Достоинством такой квазитрёхмерной модели является формальное соблюдение требований сплошности моделируемой жидкости, что важно в моделировании пространственной динамики взаимодействия волновых потоков с корпусом корабля в свободном надводном плавании.

Вычислительный эксперимент изначально проектировался в понятиях разделения решений по физическим процессам, что попутно позволяет задействовать интерактивный выбор как собственно моделей морского волнения, так и характера силового взаимодействия корпуса с интенсивным волнением, для корабля на ходу произвольными курсами относительно штормового волнения и ветра, под динамически подобными тягой движителей и рулевого управления.

В основе изысканий с морским волнением используется принцип взаимности силового воздействия штормовых волн на корпус корабля, и корабельного волнообразования, в целом зависящих от геометрии обводов и формы надводного борта корабля, омываемых гребнями штормовых волн в условиях вертикальной, бортовой и килевой качки.

Достоинством вычислительных экспериментов в гидромеханике видится возможность предварительного или интерактивного выбора различных математических моделей, что может востребоваться как для быстрой оценки штормовых явлений на море, так и для отработки поэлементных или комплексных процессов гидромеханики штормовой ходкости и безопасности плавания корабля. Разнообразие встроенных методов моделирования морского волнения безусловно полезно при отладке собственно программного комплекса, так же как и для прояснения тонких эффектов и особенностей гидромеханики корабля в опытах вычислительного эксперимента.

Следующие варианты вычислительных моделей штормового волнения задействованы в программном комплексе «Auroга» (+++):

1. Вариант штилевого моря без волнения необходим для экспериментов с удифферентованием корабля при наборе хода и активном торможении; при моделировании крена и качки корабля на ходу на циркуляции; для визуализации свободных или остаточных колебаний корпуса при мгновенном исключении из расчётов морского волнения; а также для наблюдений качки под действием внешних импульсных кренящих моментов.

2. Чисто математическое волновое поле полноценных трохоидальных волн (варианты 2,3,4) и подповерхностных скоростей течений на неравномерных регуляризованных расчётных узлах. Такая модель недеформируемого штормового моря позволяет детально отрабатывать динамику штормовой ходкости и качки корабля без усложненного влияния отражаемых от бортовой обшивки волн большой высоты.

3. Такое же математическое волновое поле на строго равномерных узлах с одинаковыми расчётными ячейками. В таком варианте сразу моделируется результирующее волновое поле без задействования лишних слоев с фиксированными длинами волн. В оптимизированном моделировании морского волнения используется единственный векторных массив, в котором компонента z включает уровень моря, а по горизонтальным осям $\{x, y\}$ – осредненные скорости подповерхностных течений. Таким образом реализуется вариант моделирования с минимальных использованием компьютерных вычислительных ресурсов.

4. Вычислительный эксперимент с использованием волнового режима в полных потоках на равномерных сеточных узлах, с гарантированным соблюдением критериев устойчивости и аппроксимационной гладкости дифференциальных аппроксимаций. Таким образом оптимизируются и значительно снижаются запросы вычислительных ресурсов компьютера, и при этом определяющая часть гидродинамических процессов в эксперименте реализуется вполне корректно.

5. Полноформатный прямой вычислительный эксперимент с трохoidalным волнением на неравномерных регуляризованных узлах, с возможностью включения дисперсии для фазовых и групповых скоростей, с проявлением корабельного волнообразования, и полноценным отражением внешних штормовых волн от бортовой обшивки корабля.

6. Тот же вычислительный эксперимент с учётом подповерхностных скоростей течений, отчасти снижающих силовые воздействия штормовых волн на корпус корабля за счёт уменьшения давления воды при учёте вызванных течений вблизи бортовой обшивки корабля. В таком варианте максимально задействуются вычислительные ресурсы компьютера.

Строгое и фактически единственное теоретическое решение о гравитационных волнах большой высоты на поверхности идеальной тяжелой жидкости получено в 1802 году [12, *Theorie der Wellen*, 1802] Францем Герстнером, профессором Пражского университета. Обобщаемая в рамках корпускулярных вычислительных схем трохоидальная модель морского волнения обладает – сильной дисперсией [БД «Vessel», 2015], проявляющейся зависимостью скорости распространения гребней волн от их длины и периода, и как следствие:

– двукратное снижение скорости распространения волновой энергии в целом по отношению к видимой фазовой скорости отдельных волновых гребней, отчего:

– фронт волны пребывает в состоянии непрерывного изменения фазы первого вступления, и вследствие чего:

– происходит квантование волновых пакетов с формированием практически стоячих центральных или «девярых» валов с обрушающимися гребнями большой крутизны, что математически проявляется как:

– гидромеханика трансформации и свободного распространения групповых структур морского волнения, и определяется сугубо нестационарными процессами на море, и – в прямом вычислительном эксперименте.

Морское волнение на открытых акваториях всегда проявляется протяженными на поверхности воды фронтами, что делает возможным математическое описание волн с использованием упрощенных двумерных профилей трохоидальных волн в плоскости локальных координат по направлению их распространения, с предопределённым вертикальным распределением скоростей течений относительно гравитационной вертикали.

Трохоидальная или гравитационная волна Герстнера на глубокой и ограниченной глубине в полной мере удовлетворяет условию неразрыв-

ности жидкости, определяется угасающим по вертикали полем скорости, и задается параметрическим описанием траекторий частиц жидкости, движущихся в локальных (лагранжевых) координатах по трохоидам с радиусом, уменьшающимся с глубиной.

На поверхности штормового моря возникают визуально регулярные ячеистые распределения ромбических пакетов с гребнями ветровых волн и выположенными склонами длиннопериодной зыби, независимо распространяющимися в групповых структурах с девятими валами в условиях простой взаимной амплитудной модуляции. Рис. 37 приводит трохоидаальный профиль на фоне фотографии с гребнями ветровых волн, бегущих поверх зыби соизмеримой высоты. На пологих склонах зыби сохраняется динамика проявления девятых валов ветровых волн, однако, отчасти сбивается ритм обрушения их гребней, отчего отчасти сбивается видимость строгой регулярности групповых структур.

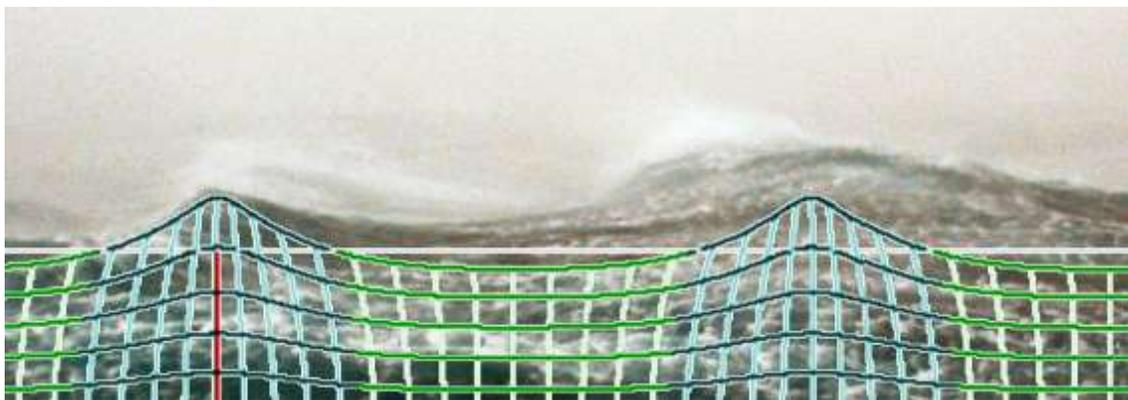


Рис. 37. Характерная форма трохоидаальной прогрессивной волны. Угол склона вблизи вершины достигает 30° . При длине волны $\lambda = 100$ м (период 8 сек.), суммарная высота от впадины до вершины порядка 12 м (прилив/отлив $+9 / -3$ м), а скорость набегающего потока в гребне достигает 20 узлов

Вычислительная модель морских волн и волновых потоков получается в последовательном алгоритмическом построении линий тока и траекторий движения элементарных частиц жидкости, для которых трохоидаальное проворачивание привносит дисперсионные свойства в виде уд-

воения скорости гребней, а при встречном раскручивании – к подтормаживанию фазовых скоростей, что моделирует полуторное ускорение пространства волновой энергии под влиянием капиллярных эффектов – сил поверхностного натяжения.

Морское волнение на открытых акваториях проявляется протяженными на поверхности волновыми фронтами, что делает возможным математическое описание волн с использованием двумерных профилей трохоидального волнения³⁰ в плоскости локальных координат по направлению распространения, в которых горизонтальные и вертикальные смещения частиц жидкости сопоставимы по размаху колебаний.

Трохоидальные колебания качественно связываются аналитическими зависимостями для скоростей течений в плоскости направления распространения и гравитационной вертикали, однако, построение соответствующих разностных схем для трансформации морских волн при отражении от обшивки корабля пока затруднительно.

Практическое моделирование проводится с использованием уравнений с фиксированной скоростью волновых фронтов $C_w = \sqrt{g \cdot \lambda / 2\pi}$ и воздействием разностных схем в полных потоках³¹, моделирующих свободное распространение волновых импульсов произвольной формы. Включение в граничные условия генерации привходящих трохоидальных волн послужит автоматическому воспроизведению групповых структур штормового волнения и локальных течений по всей акватории вычислительного эксперимента.

Для воссоздания динамически подобной обстановки в штормовом море возможно наложение независимых решений по нескольким волно-

³⁰ Гармонические синусоидальные профили волн представляются частным случаем трохоидальных, при условии исчезающе малой высоты волн: $h=2r_w$.

³¹ Волновые уравнения связываются скоростью распространения импульса, зависящей от локальной реологии состояния частиц жидкости. В длинноволновых уравнениях это глубина моря, в газовой динамике – плотность воздуха, и т.п.

вым структурам с произвольными векторами движения и амплитудно-частотными характеристиками. Для открытого океана это могут быть предельно крутые ветровые волны, и одна-две дополнительные системы зыби меньшей интенсивности от удалённых штормов.

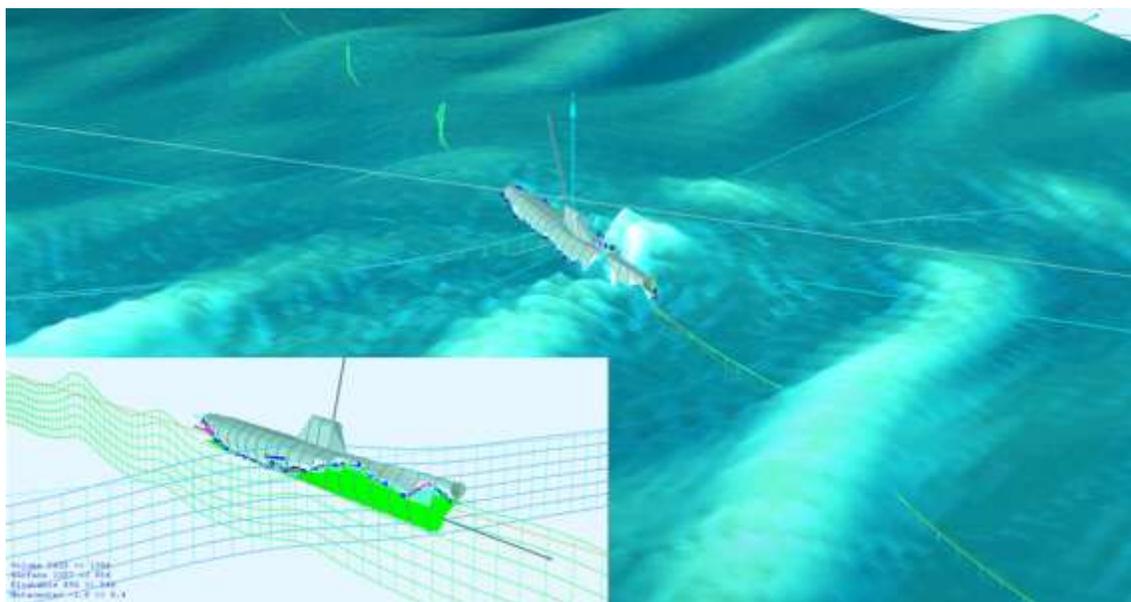


Рис. 38. В вычислительном эксперименте выполняется визуализация всех трех монохроматических полей, и их суммарного представления во взаимодействии с корпусом корабля. В отдельном окне представляется динамика собственно корпуса корабля и в окружении только профилей морского волнения.

В вычислительном эксперименте каждое волновое поле моделируется пакетами прогрессивных волн (Рис. 38), разделённых на ромбические ячейки в цугах по девять, со смещением фазы на треть π по смежным границам, и с обратной фазой $+\pi$ в угловых сопряжениях цепочек последовательных цуг волн.

В навигационной практике, как и на бортовых гидрометеостанциях, для срочных телеграмм визуально фиксируются ветровое волнение на фоне одной-двух одновременно действующих структур зыби от удалённых штормов. В программе «Аугога» принимаются к моделированию следующие волновые структуры штормовых волн:

Wind – свежее ветровое волнение, развивающееся под действием ветров. Период волн порядка 6 – 8 секунд для морских акваторий, и может достигать 10 – 12 секунд в открытом океане. Высота конкретных волн предельно высокая, что визуально, на фоне относительно пологой зыби, отмечается крутыми гребнями с высотой более 5 – 6 метров, разгоняющихся под ветровым напряжением шестибального шторма.

Swell – свежая штормовая зыбь. При усилении шторма в северном полушарии ветер заходит влево против часовой стрелки, при ослаблении отходит к востоку по часовой стрелке. На море всегда присутствует относительно свежая зыбь, отклоняющаяся от направления ветра на угол порядка 30 градусов. Высота волн зыби соизмерима со свежим ветровым волнением, длина в полтора-два раза большая, и крутизна не грозит обрушением гребней. На вершинах штормовой зыби происходит обрушение гребней ветровых волн.

Surge – длинная волна далекой зыби наблюдается в открытом океане, обычно она приходит из более высоких штормовых широт. Высоту волн далекой зыби можно полагать вдвое меньше свежей зыби, а направление близкое к меридиональному, т. е. в северных широтах³² – южное, в южных – на север, в сторону экватора.

При неблагоприятном сложении всех волн можно ожидать экстремальную высоту до 13 – 15 метров, с преобладающей крутизной гребней в диапазоне 8 – 10 метров. В групповой структуре трохоидальных волн присутствуют «девятые валы» с удвоенной высотой, всегда выделяющиеся белизной обрушающихся гребней на подветренных склонах круче 45°.

В океанографии хорошо зарекомендовали себя условно монохроматические волновые решения [3] в полных потоках, которые в канонической форме определяют динамику распространения относительно гладких

³² Ветер дует в картушку компаса, волны движутся по направлению из картушки.

волновых импульсов произвольной формы. В качестве источника корректно воспользоваться геометрической формой трохоидального волнения, тогда монохроматические условия по сохранению периодов волн во времени, при фиксированной скорости фазовой волны, послужат удовлетворению требований неразрывности в потоках жидкости, включая согласование энергетических характеристик конкретных волновых гребней.

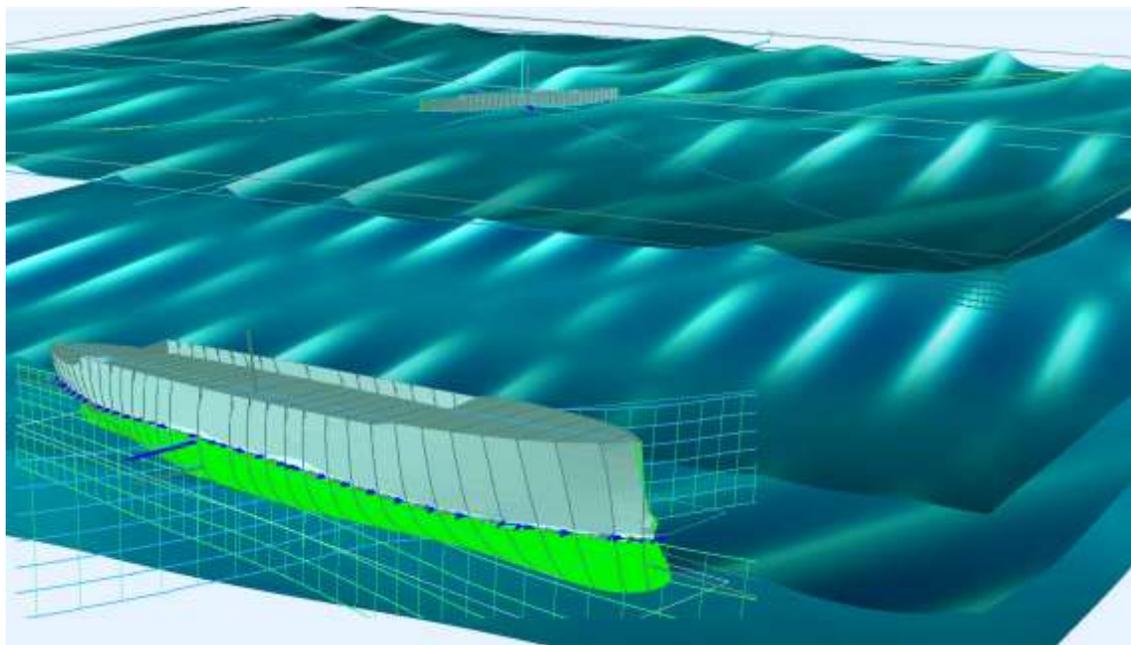


Рис. 39. В проведении вычислительного эксперимента выполняется визуализация всех трех монохроматических полей и их суммарное представление во взаимодействии с корпусом корабля, а также создается отдельное изображение для представления динамики собственно корпуса корабля и профилей морского волнения в другом удобном масштабе.

Однако, такой вычислительный эксперимент будет проходить для всех трёх (или более) монохроматических волновых полей независимо (Рис. 39), с применением их суперпозиции и последующем моделировании взаимодействия всех волн и штормовой гидромеханики корабля.

Пространственный волновой процесс может быть синтезирован по геометрическим правилам интенсивного трохоидального волнения моря, для которого основные законы гидромеханики, условия неразрывности и сохранения энергии согласовываются на этапах аналитического решения исходной задачи. При соблюдении аппроксимационных критериев, контролирующих гладкость и неразрывность градиентов моделируемых функций, можно полагать, что свойства исходных аналитических решений распространяются на гидромеханику моделируемого морского волнения, включая нестационарные процессы и сложные волновые явления, проявляющихся в прямых вычислительных экспериментах аналогично естественным волновым процессам открытого моря.

Пусть исходными условиями вычислительного эксперимента фиксируется длина одиночных волн λ [м] в групповых структурах, дисперсионными соотношениями будет определяться $C_w = \lambda / \tau$ [м/сек] – фазовая или видимая скорость перемещения гребня конкретной волны на глубоком море слева, и мелководье – справа:

$$C_w = \sqrt{\frac{g \cdot \lambda}{2\pi}} \Rightarrow \sqrt{\frac{g \cdot \lambda}{2\pi} \operatorname{th} \frac{2\pi \cdot H}{\lambda}} \Leftarrow \sqrt{g \cdot H} \quad [\text{м/сек}]$$

где: λ [м] – длина волны; H [м] – глубина море; τ [сек] – видимый период волны относительно поверхности условно неподвижной воды; C_w [м/с] – фазовая скорость свободного распространения одиночной волны.

Период волны фиксируется относительно условно неподвижной точки в пространстве для глубокого моря, или точки на дне моря мелкого:

$$\tau = \frac{\lambda}{C_w} = \sqrt{\frac{2\pi \cdot \lambda}{g}} \Rightarrow \sqrt{\frac{2\pi \cdot \lambda}{g} \cdot \operatorname{cth} \frac{2\pi \cdot H}{\lambda}} \Leftarrow \frac{\lambda}{\sqrt{g \cdot H}} = \frac{2\pi}{\omega}, \quad [\text{сек}]$$

где ω [сек⁻¹] – частота проявлений волн времени.

Математическая модель трохойдального волнения $\vec{\zeta}(t, s, z)$ [м] записывается в векторной форме на плоскости профиля $w \in \{s, z\}$ по направлению распространения фронта волны s [м] с гравитационной вертикалью z [м]. Фазовый отсчёт фронта волны в вычислительном эксперименте исходит из нулевого начального времени t [сек] и полудлины диагонали модельной акватории Lb [м].

$$\varphi_w = 2\pi \frac{t \cdot C_w - s - Lb/2}{\lambda} \quad [rad](1)$$

где: λ [м] – длина волны, движущейся со скоростью C_w [м/с], в плоскости профиля $w \in \{s, z\}$ на момент времени t [сек], из исходного местоположения s [м], с учётом центровки начальных отсчётов относительно половины диагонали цифрового опытового бассейна Lb [м].

Граничными условиями вокруг прямоугольной расчётной акватории предопределяется полувысота волны с помощью трохойдального радиуса r_w [м] на уровне невозмущенной поверхности моря $z = 0$ [м], от которой выполняется уточнение этого орбитального радиуса движения для каждой элементарной частицы жидкости, в зависимости от её мгновенной глубины под свободной поверхностью воды r_z [м]:

$$r_z = \exp(2\pi z / \lambda) \quad [м]. \quad (2)$$

Построение аналитической модели интенсивного трохойдального морского волнения.

Волна Герстнера (Рис. 40) ассоциируется с круговыми циклоидами, в которых радиус траектории частиц жидкости $r_w = 1.134 \cdot \lambda_w \cdot h_w / 4\pi$ [м] фиксируется относительно (z_w) – спокойного уровня моря, отчего аппликата гребня имеет тот же размах, что и впадина волны; λ_w [м] – длина волны; h_w – условная или относительная высота волны, задается в норми-

рованном интервале [0..1], и в случае $h_W=1$ соответствует предельной высоте волны (Рис. 40-б) с обрушающимся гребнем:

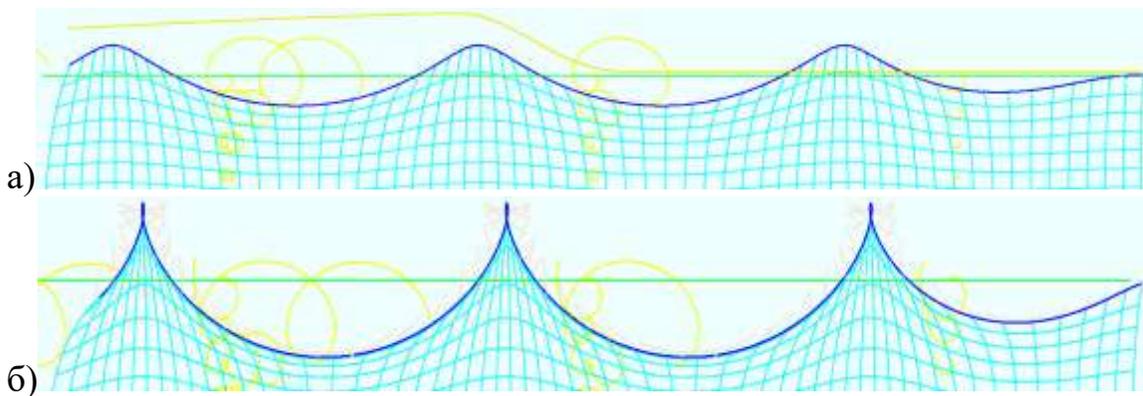


Рис. 40. Иллюстрации аналитических решений для простых троиходальных циклоид. а) – прогрессивная волна Герстнера, и б) – вариант предельно высокой или стоячей волны.

$$\zeta_Z = r_W \cdot \cos(x_W) \cdot \exp(-2\pi \cdot z_W / \lambda_W) \quad [M]$$

Горизонтальное смещение этой же частицы относительно исходного узла в прогрессивной волне задается аналогичной зависимостью с горизонтальным смещением на четверть полной фазы:

$$\zeta_X = -r_W \cdot \sin(x_W) \cdot \exp(-2\pi \cdot z_W / \lambda_W) \quad [M]$$

Критическая высота волн Герстнера (Рис. 40-б) дает правильное соотношение высоты к длине волны, однако не обеспечивается ограничение гребня стоячей волны в 60° при крутизне $\approx 1/4$, не отслеживается также крутизна прогрессивной (бегущей) волны порядка $\approx 1/7$ при максимальном слоне гребня не более 30°

К настоящему времени отсутствуют сколь-нибудь строгие теоретические разработки для построения математических и вычислительных моделей групповых структур реального морского волнения.

В принятой здесь адаптированной модели регулярного волнения включается лишь зависимость радиуса траектории от мгновенной глуби-

ны погружения частицы жидкости, участвующей в условно независимом движении по Лагранжевым траекториям (Рис. 41).

На Рис. 41 приведены трохоидальные траектории дрейфовых течений в зависимости от относительной высоты гребня волны и заглубления частицы жидкости. Максимальная скорость поверхностных течений достигается в гребне обрушающейся прогрессивной волны, и может приближаться по величине к фазовой скорости прогрессивной волны.

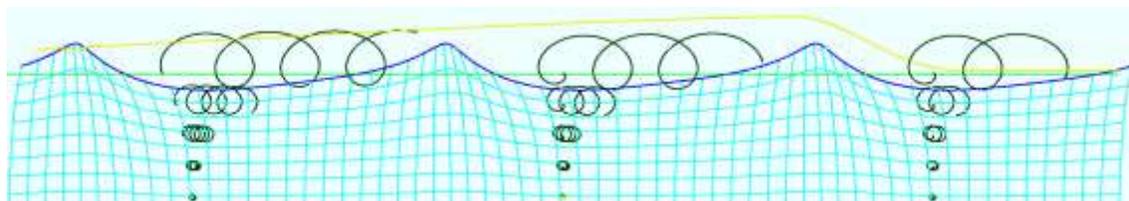


Рис. 41. Моделирование регулярных трохоидальных волн под действием напряжения приводного ветра с поправкой на смещение среднего уровня моря. Сетка под волной иллюстрирует дрейфовые смещение частиц и линии равного давления под поверхностью волны. Над волной показаны квазитрохоидальные траектории частиц жидкости в движении со строго фиксированными угловыми скоростями, определяющими фазовую скорость волны, но с изменяющимися радиусами локальных скоростей, уменьшающихся с глубиной погружения частицы под поверхностью воды.

Компенсирующий подъем уровня моря (Рис. 41) получается введением поправки к радиусу траектории частиц жидкости в зависимости от глубины погружения в заданный момент времени: ${}^A R_W = {}^A K \cdot r_W \cdot (\cos x_W - 1)$, где ${}^A K = [1, 0.. \sqrt{2}]$ – коэффициент при радиусе траектории частицы приводит к образованию кноидальных гребней и выравниванию (подъему) среднего уровня моря. Величина ${}^A K$ принимается несколько меньшей 1, что ослабляет эффект формы волн под порывистыми ветрами, и предотвращает чрезмерность высоты гребней (циклоидальные петли) в процессе интерференции с другими или встречными волнами в акватории вычислительного эксперимента.

Под действием ветра снижается давление на наветренном склоне волны, где ветер скользит по поверхности с большой скоростью, и приподнимая выполаживает наветренный склон волны. Подветренный склон попадает в зону повышенного давления, где скорость приводного ветра значительно падает, или снижается до нуля с образованием воздушного вихря.

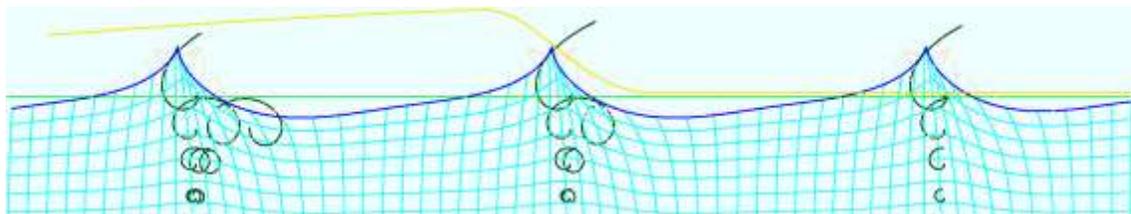


Рис. 42. Оценка экстремального процесса при моделировании регулярных трогоидальных волн с вертикальным смещением среднего уровня моря под действием ветрового напряжения.

Параметр, смещенный на четверть фазы, определяет коэффициент ветрового напряжения и задает асимметрию крутизны наветренного и подветренного склонов волнового гребня (Рис. 42): ${}^wR_W = {}^wK \cdot r_W \cdot (\sin x_W - 1)$, где ${}^wK = [0..1]$ – коэффициент ветрового напряжения принимается близким к единице для свежих ветровых волн, и уменьшается до нуля для волн зыби. На двумерной поверхности моря коэффициент wK используется в скалярном произведении векторов действия надводного ветра и направления движения морской волны.

$$\zeta_Z = r_W \cdot \cos(x_W) \cdot \exp\left(2\pi \cdot [-z_W + r_W \cdot {}^A K (\cos x_W - 1) + r_W \cdot {}^w K \cdot \sin x_W] / \lambda_W\right)$$

$$\zeta_X = -r_W \cdot \sin(x_W) \cdot \exp\left(2\pi \cdot [-z_W + r_W \cdot {}^A K (\cos x_W - 1) + r_W \cdot {}^w K \cdot \sin x_W] / \lambda_W\right)$$

В таком варианте на поверхности воды моделируется комплекс кинетической и потенциальной энергии в соответствии с законом Бернулли для давления и скорости потока:

$$\frac{\rho \cdot V^2}{2} + \rho \cdot g \cdot \zeta_W = Const, \quad [H/m^2]$$

где скорость частиц жидкости V в гребне волны вносит существенную поправку к условному давлению $\rho \cdot g \cdot \zeta_w$ на поверхности воды, вплоть до его обнуления в обрушающемся гребне волны.

Групповые структуры трохоидаальных волн.

В рамках вычислительной модели для монохроматических гравитационных волн применяется параллельное моделирование двух волновых полей: первое для регулярного волнения с видимой длиной морского волнения; второе – для оконтуривающих волновых фрагментов девятикратно большей протяженности, и распространяющихся по тем же законам, но со скоростью вдвое меньшей (рис. 3). Произведение независимых существующих волновых полей позволяет моделировать групповые структуры волновых пакетов.

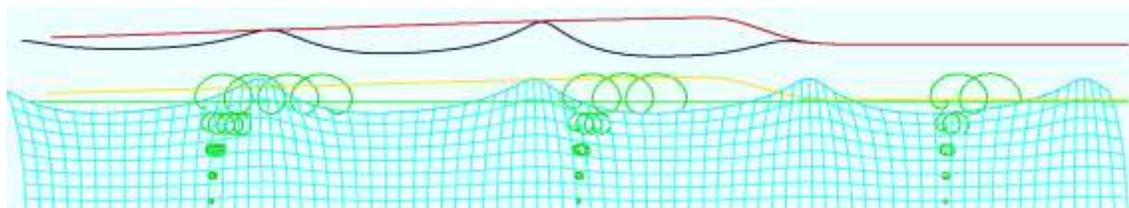


Рис. 43. Произведение фазовых волн с оконтуривающим волновым полем групповых пакетов.

Первое вступление оконтуривающего поля задается особой сглаживающей функцией, по форме близкой к профилю фазовых волн, и определяет непрерывное изменение фазы фронта первого вступления морской волны, и что требуется для моделирования расходящиеся корабельных волн.

В другом, значительно упрощенном варианте вычислительного эксперимента, групповые структуры могут быть созданы суперпозицией регулярных волн с близкими периодами и взаимно встречными направлениями движения. Интерференция волн с соизмеримой длиной приводит к биениям, в которых девятые валы получают удвоенную высоту со свойствами стоячей волны. Это позволят создавать вполне адекватное волновое

поле для всего вычислительного эксперимента в целом. Однако для случая корабельных волн, обладающих особым фронтом первого вступления, такая методика неприменима.

Максимальная амплитуда в гребне волны Герстнера [18, Поисковые.., 2018] оценивается круговыми циклоидами, в которых радиус траектории на гребне волны представляется приближенно как: $R^{up} \approx 1,134 \cdot r_w$, что по величине заметно больше сопутствующего отлива во впадине $R_{dn} \approx 0,614 \cdot r_w$. Таким образом, высота трохоидаальной волны отличается от размерений длины пробега циклоиды $h = \lambda / \pi$ или $r_w = \lambda / 2\pi$, и принимается в расчётах приближенно как: $h \cdot k \approx 0,75$ или $\lambda / h \approx \pi \cdot 8 / 3 \approx 8,38$, где h – видимая высота чисто прогрессивной волны от подошвы до гребня.

В алгоритмических моделях волновых процессов удобно использовать коэффициент: $H_w = 8/3 \cdot \pi \cdot h / \lambda$, нормированный относительно максимально допустимой высоты обрушающихся трохоидаальных волн, где: $h = 2 \cdot r_w$ [м] – предельная высота волны в качестве удвоенного условного радиуса поверхностной трохоиды.

Полагаем движение частиц жидкости по собственным трохоидаальным траекториям под поверхностью воды, где давление волны выравнивается соотношениями глубины и локальной скорости этих частиц под волновыми склонами. Симметричная поправка относительно фазы волны $Cr \approx [0 \div H_w \div 1]$ к локальному заглублению r_z отчасти согласует осреднённый или равнообъёмный уровень воды для гребней с заострёнными вершинами и гребней кноидаальных волн.

Симметричная поправка относительно фазы волны $Cr \approx [0 \div H_w \div 1]$ к локальному заглублению r_z , отчасти компенсирует потерю объёма жидкости при образовании заострённых вершин кноидаальных волн.

$$r_z \times = \exp(2\pi r_z \cdot Cr \cdot \cos \varphi_w / \lambda) \quad [м], \quad (3)$$

По наблюдениям моделируемых в вычислительных экспериментах волновых процессов, поправка на средний уровень будет служить в качестве коэффициента крутизны волны: $Cr \approx H_w$.

При необходимости вводится дополнительная ассиметричная поправка к профилю волны для учёта ветровых напряжений: $Wd [0 \div \sqrt{0,5} \div 1]$:

$$r_z \times = \exp(2\pi r_z \cdot Wd \cdot (\sin\varphi_w - 1) / \lambda) \quad [M], \quad (4)$$

которая может применяться исключительно к ветровому волнению с осреднённо значимым сдвигом, как: $Wd \approx \sqrt{0,5} \approx 0,7071$.

Групповые структуры волнения образуют ромбические ячейки с вытянутостью в направлении распространения гребней: $L_g = \lambda \cdot 8.89 [M]$, а наибольшая протяжённостью фронта – ширина ромбического фрагмента акватории:

$$F_g = 2\pi \cdot \lambda / H_w \quad [M]$$

обратно пропорциональна относительной высоте девятого вала в центре групповой структуры волн.

При использовании математической модели трохоидаальных волн настраивается вдвое меньшая скорость распространения оконтуривающей групповой структуры, нежели фазовые скорости волновых фронтов внутри неё. В случае прямого вычислительного эксперимента с конечноразностным построением дисперсионных свойств волновых процессов, вышеприведенные поправки неприменимы, как некорректно воссоздающие потоки воды под склонами волн, и как несоответствующие исходным теоретическим решениям для трохоидаальных волн Герстнера. [12. Герстнер...1802]

Собственно профиль математической модели поверхностной волны строится в векторной форме на основе локального радиуса r_z , применяемого для простого гармонического смещения частиц воды от их исходно нейтрального положения:

$$\vec{\zeta} = r_z \cdot \left\{ -\cos \varphi_w, \sin \varphi_w \right\}. \quad [M] \quad (5)$$

В гравитационной волне частицы жидкости движутся по трохоидальным орбитам со строго одинаковыми угловыми скоростями:

$$V_r = \omega \cdot r_z \quad [M/c],$$

определяющими фазовую скорость свободного движения гребня прогрессивной волны:

$$C_w = \lambda / \tau = \omega / k \quad [M/c].$$

Принимая надводное пространство (воздух) условно невесомым, погружение частицы жидкости отсчитывается от уровня действующих волновых склонов, тогда как радиусы трохоид и кривизна траекторий частиц масштабируются в геометрических пропорциях трохоидальной волны в целом (2) и (3):

$$V_r = \omega \cdot r_z = \omega \cdot r_w \cdot e^{kz}.$$

или, для поверхности моря:

$$V_w = \omega \cdot r_w \cdot \exp(2\pi / \lambda \cdot (z + r_w \cdot (\sin \varphi - 1))), \quad [M/c] \quad (6)$$

где: z – аппликата в глобальной декартовой системе отсчёта.

Представленная модель морского волнения обеспечивает необходимый комплекс данных о состоянии моря для проведения штормового вычислительного эксперимента: включая гидростатическое давление и скорость течения воды в любой точке подводного пространства и вблизи бортовой обшивки корабля.

Видимые (фазовые) и групповые скорости гравитационных волн

Гравитационные волны на поверхности тяжелой жидкости обладают своеобразными дисперсионными свойствами, которые видимы при первом вхождении свободно распространяющейся волновой энергии, когда

фаза волнового фронта постоянно изменяется. На глубокой воде фазовая скорость волны вдвое быстрее групповой, а под действием поверхностного натяжения в реальной жидкости одиночные волны отстают от видимой скорости продвижения волнового фронта.

По определению, волновая дисперсия связывается соотношением фазовой скорости волны к её длине [15, Механика..., 1949, стр. 235]:

$$U = C_w + k \frac{dC_w}{dk} = C_w - \lambda \frac{dC_w}{d\lambda},$$

следовательно, у длинной волны $C_w = \sqrt{g \cdot H}$ скорость фронта зависит от глубины моря H [м], и распространение волновой энергии происходит со скоростью видимого фронта, дисперсия – отсутствует.

Волна на глубокой воде $C_w = \sqrt{g \cdot \lambda / 2\pi}$, что после дифференцирование приводит к соотношению: $U = C_w / 2$. Скорость капиллярных волн зависят от плотности и поверхностного натяжения – реологических свойств жидкости:

$$V = \sqrt{\frac{\sigma \cdot 2 \cdot \pi}{\rho \cdot \lambda}}$$

или $U = 1,5 \cdot C_w$. При длине волны $\lambda_{cg} \approx 1,73$ см скорости капиллярных волн выравниваются с глубоководными, в таком случае дисперсионные соотношения усложняются соотношениями трохоидаальных волн с капиллярными. Аналогично, близбереговые расчёты могут ориентироваться соотношением:

$$\frac{U}{C_w} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2 \cdot k \cdot H}{sh(2 \cdot k \cdot H)} \right),$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

Для построения визуальной кинематики профилей трохоидаальных волн с дисперсией можно воспользоваться оператором для удвоенного вращения расчётных частиц жидкости – расчётных точек на волновых профилях по трохоидаальным радиусам: $\vec{\zeta} \cdot \overset{\rightarrow}{rot}(\omega t)$, при этом в вычислениях вместо фазовой скорости C_w должна использоваться групповая U . По

аналогии, в случае капиллярных волн дисперсионное соотношение согласуется простым изменением знака перед круговой скоростью $\vec{\zeta} \cdot \text{rot}(-\omega t/2)$. Положительное приращение фазового угла: $\varphi_w += \omega t$ для глубоководной волны, и с обратным знаком замедление вдвое: $\varphi_w -= \omega t/2$ – в точности моделирует кинематику для волн капиллярных.

В вычислительном эксперименте задействуются два варианта генерации трохоидального волнения, включающих построение взволнованной поверхности моря с пространственным распределением скоростей течений жидкости на всю расчётную глубину.

1) при моделировании морского волнения на основе разностных уравнений гиперболического типа исходные аналитические выражения применяются на свободных границах расчётной акватории, вне зависимости от математических и алгоритмических особенностей

Алгоритмическое представление моделей штормового волнения

Построению вычислительной модели в конечных разностях предшествует анализ устойчивости вычислительных процессов во времени и предварительное согласование аппроксимационной гладкости моделируемых гидродинамических полей.

Устойчивость волновых уравнений вполне надёжно контролируется с помощью критериев Куранта, суть которого в недопущении пересечения моделируемых возмущений расчётной ячейки целиком за один расчётный такт по времени.

$$C_w < \delta s / \delta t, \quad (7)$$

где: C_w [м/с] – заданная фазовая скорость моделируемой волны; δs [м] – шаг сетки здесь предполагается одинаковым по всей расчётной области; δt [сек] – шаг времени для одного цикла вычислительного эксперимента.

Для достижения равной эффективности в моделировании трех волновых полей с различающимися длинами волн можно в качестве начальных условия установить расчётный шаг во времени δt [сек], что естественным образом будет соотноситься с представлениями об аппроксимационной гладкости волновых процессов, период собственных колебаний которых должен быть хотя бы на порядок больше. Тогда именно шаг пространственной сетки будет назначаться динамически, как $\delta s = C_w \cdot \delta t$ [м], что создаст одинаково оптимальные условия моделирования для независимых волновых полей с наперед заданным фазовыми скоростями.

На практике для устойчивого решения приходится немного уменьшать расчётный шаг во времени δt [с]. Для прямоугольной сетке обычно достаточно приводить пересечение волновым фронтом одной ячейки по диагонали за два шага во времени: $tKrat \approx \sqrt{2}$ – кратность дробления шага во времени. В вычислительном эксперименте изменение расчётного шага во времени не приводит к видимым изменениям результатов моделирования, кроме немного негативного влияния на условия излучения волн на свободных границах – условиях излучения по Зоммерфельду, в котором для нормальной компоненты излучаемой волны необходимо привнести поправку к шагу по времени в виде:

$$tK = tKrat / (tKrat + 1).$$

Для упрощения алгоритмической записи вводится безразмерный параметр-характеристика волны как: $kW = C_w \cdot \delta t / \delta s / tKrat$ – отношение скорости волны к скорости прохода по сетке.

Экстраполяционные условия по Зоммерфельду определяются на свободных границах для свободного излучения прогрессивных волн с определенной величиной фазовой скорости C_w , и применяются в расчётах смещения нормальной компоненты склона убегающей волны:

$$\begin{aligned} \vec{\zeta}_0^+ &= kW \cdot (\vec{\zeta}_1 - \vec{\zeta}_0) \cdot tK = C_w \cdot \frac{\delta t \cdot (\vec{\zeta}_1 - \vec{\zeta}_0)}{\delta s \cdot (tKrat + 1)} \\ \vec{\zeta}_n^+ &= kW \cdot (\vec{\zeta}_{n-1} - \vec{\zeta}_n) \cdot tK = C_w \cdot \frac{\delta t \cdot (\vec{\zeta}_{n-1} - \vec{\zeta}_n)}{\delta s \cdot (tKrat + 1)} \end{aligned} \quad [M], \quad (8)$$

где: n – нижние левые индексы используются для отметки используемых узлов сетки; символ (+) в качестве левого верхнего индекса показывает следующий отсчёт времени.

Динамика частиц жидкости строится в вертикальной плоскости волнового профиля, где разделенные на половину пространственного шага сеточные разности обеспечивают синхронное взаимодействие векторов смещений частиц жидкости $\vec{\zeta}$ [M] с их локальными скоростями \vec{v} [M/c] с привязкой к фазовой скорости распространения волны C_w [M/c] и углового вращения составляющих её частиц ω [1/c]:

$$\begin{aligned} \vec{\zeta}_s^+ &= kW \cdot (\vec{v}_s - \vec{v}_{s-1}) / \omega = C_w \cdot \frac{\delta t \cdot (\vec{v}_s - \vec{v}_{s-1})}{\delta s \cdot tKrat} / \omega \quad \{s \in 1 \div n - 1\} \\ \vec{v}_s^+ &= kW \cdot (\vec{\zeta}_{s+1} - \vec{\zeta}_s) \cdot \omega = C_w \cdot \frac{\delta t \cdot (\vec{\zeta}_{s+1} - \vec{\zeta}_s)}{\delta s \cdot tKrat} \cdot \omega \quad \{s \in 1 \div n\} \end{aligned} \quad [M] \quad (9) \quad [M/c]$$

где крайние узлы с колебаниями уровня и дрейфа частиц жидкости $\vec{\zeta}_s^+$ экстраполируются по текущим полям в граничных условиях (8).

Дисперсионные эффекты трохоидальных волн проявляются при рассмотрении вращения ω_z частиц жидкости относительно центров трохоидальных радиусов. При попутном вращении $+\omega$ моделируется удвоенная фазовая скорость относительно скорости распространения пакетов волн, при обратном знаке $-\omega$ групповая скорость возрастает в 1,5 раза относительно видимой скорости волновых фронтов, что характерно для капиллярных волн поверхностного натяжения. В обоих случаях дисперсионных

влияний визуально меняется фаза первого вступления волны по линии фронта невозмущенной акватории:

$$\begin{aligned} \vec{\zeta}^+ &= \delta t \cdot \omega \cdot \left\{ -\vec{\zeta}_z, \zeta_x \right\} = \delta t \cdot \omega \cdot \left\{ -\zeta_z + \zeta_x \cdot \delta t \cdot \omega / 2, \zeta_x + \zeta_z \cdot \delta t \cdot \omega / 2 \right\} \\ \vec{v}^+ &= \delta t \cdot \omega \cdot \left\{ -\vec{v}_z, v_x \right\} = \delta t \cdot \omega \cdot \left\{ -v_z + v_x \cdot \delta t \cdot \omega / 2, v_x + v_z \cdot \delta t \cdot \omega / 2 \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

Заключение

Собственно теория трохoidalных волн содержит наглядную интерпретацию вычислительных процессов с использованием движения частиц жидкости в подвижных Лагранжевых координатах, что естественным образом представляется на корпускулярном этапе прямого вычислительного эксперимента с использованием численных методов тензорной математики, метода крупных частиц жидкости. Дрейфовое течение в верхних слоях жидкости моделируется изменением кривизны траектории движения частиц в зависимости от мгновенного изменения уровня в волновом профиле. Таким образом, вычислительная модель изначально предусматривает рассмотрение нестационарной гидромеханики корабля в штормовом море. Вычислительные ресурсы современных компьютеров вполне достаточны для реализации прямых вычислительных экспериментов в реальном времени, в том числе на борту корабля в открытом море, что может быть востребовано при выборе оптимальных и эффективных режимов штормового плавания.

IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ МОРЕХОДНОСТИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ПРОРАБОТКОЙ ОБВОДОВ КОРПУСА КОРАБЛЯ

Целью настоящих изысканий видится возможность построения опытовых экспериментов, предельно точно и наглядно моделирующих управляемое маневрирование корабля в реальном времени в условиях интенсивного штормового волнения. Корабельная гидромеханика, так же как и волновые процессы на поверхности моря не изобилуют разнообразием геометрических форм и сложностями динамических процессов, существенно ограничивающихся законами неразрывности в относительно малых объемах жидкости с условиями сохранения и равномерного распределения энергии волновых пакетов по поверхности глубокой воды. Основные выводы физико-математических исследований в предыдущих главах сводятся к заключению, что серия реализованных вычислительных экспериментов представляет строго завершенное и однозначное в плане математической достаточности функциональное решение.

Совершенствование численных схем до уровня суперкомпьютерных методов «конечного объема» привносит сложности согласования обобщенных потоков и напряжений под гребнями волн и на судовой обшивке в рамках обобщенных законов Бернулли для нестационарной корабельной гидромеханики.

Очень важно, что все шесть реализованных моделей штормовой гидромеханики корабля дают сходные результаты, с возможностью адекватной оценки возникающих отличий включением дополнительных условий штормового взаимодействия корабля с трохоидальным морским волнением.

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

Рассмотрение ключевых элементов в построении корабельных обводов целесообразно начинать с анализа влияния гидростатических характеристик и особенностей обводов и формы надводного корпуса в планах:

- минимизации кренящего и дифференцирующего воздействия крутых склонов штормовых волн, при безусловном поддержании запасов устойчивости в условиях вертикальной и бортовой качки корабля;

- поддержание начальной устойчивости на нуле или положительном минимуме в условиях интенсивной вертикальной и килевой качки, так же как при быстрых изменениях уровня и наклонов взволнованной поверхности моря;

- влияние изменчивости моментов инерции по площадям ватерлиний должно следовать цели сохранения малости внешних силовых воздействий со стороны штормового волнения, с предопределением условий взаимокompенсации волновых сил и моментов гидростатического и гидродинамического характера.

- изменчивость формы шпангоутов, особенно в зонах скуловых закручиваний набегающего и спутного потока, должна строго следовать минимизации интенсивности корабельного волнообразования, в предположении аналогичного эффекта уменьшения силового воздействия штормовых волн со сходными динамическими характеристиками.

В качестве иллюстраций приводятся результаты вычислительных экспериментов с различными: элементарными; гипотетическими; перспективными; современными и историческими проектами кораблей и судов.

В отработке проектных решений по новому кораблю желательно изначально ориентироваться на возможные особенности кораблевождения, которые будут синтезироваться в форме наставлений мореплавателям по выбору оптимальных режимов штормового хода или штормования, в том числе опирающихся на реальный опыт навигации в особых гидрометеорологических и географических условиях, что необходимо для обоснованного выбора и назначения хода и курса корабля по следующим критериям:

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

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

с) разрешения проблемы установки режима 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.

К морской практике

При востребовании опыта хорошей морской практики [18, Поисковые...-2018] непротиворечивое или целевое проектирование всепогодного корабля целесообразно ориентировать не только на оптимальное построение обводов корпуса и общекорабельной архитектуры для глубоководных акваторий открытого моря. Корабль вынужденно проходит мелководьями, и потому в наставлениях мореплавателям требуется не только реко-

мендации по выборы наилучшей ходкости или плавности качки с малым размахом углов крена в открытом море, но также и для минимизации силового воздействия гребней крутых волн и зыби на морских банках, в мелководьях и узкостях прибрежных фарватеров, где нередко проявляются экстремальные кноидальных валы и потоки течений – тягунов, в том числе с непредсказуемой динамикой под воздействием близбереговой длиннопериодной зыби.

В реальной морской практике существует проблема пропавших кораблей, что связано со сложностями формализации опыта экстремального кораблевождения, невозможностью и опасностью практического опробования мореходных качеств корабля на различных штормовых курсах и скоростях хода. Трудно признавать корректным анализ судовых журналов, с присущими субъективными факторами судоводительских заключений с вычищаемыми от «лишнего» записями. Адекватности заключений из опыта штормового маневрирования может послужить задействование независимой телеметрии для контроля состояния моря и реакции корабля по ходкости, качке 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 слепопроектный анализ мореходности располагает недоопределённой по составу и слабой по качеству измерительной информацией, и даже при серьёзной штормовой трёпке никто не будет рисковать кораблём и экипажем, а значит, не будут складываться достаточно полные или значимые морские исследования.

Решение проблемы возможно в условиях полноценных опытовых испытаний в составе вычислительных экспериментов по моделированию штормового маневрирования корабля.

Полноценные и всеобъемлющие изыскания по штормовой мореходности с обоснованиями наставлений мореплавателям, для конкретных проектов кораблей, могут быть отработаны исключительно по результатам серии прямых вычислительных экспериментов. К тому же, в состав наставлений мореплавателям становится возможным представление тех же специализированных по конкретному проекту математических моделей и адаптированных вычислительных экспериментов в составе штурманской расчётно-информационной аппаратуры. Тогда, в оперативной обстановке, с использованием визуальных оценок состояния моря и показаний бортовой телеметрии, будут выполняться аналогичные проектным обоснования мореходных качеств, но уже для выработки конкретных навигационных решений:

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

Гидростатические оценки и ориентация на ходкость

Предпроектные изыскания на ранних этапах отработки корабельных обводов и надводного борта в диапазонах рабочих посадок, вполне допускают гидростатические оценки по запасам остойчивости на больших углах крена, с вариантами уменьшения моментов инерции площадей переменных ватерлиний для лучшей штормовой ходкости при минимальной

килевой качке. Практика прорисовки теоретических чертежей показывает, что обе геометрические задачи согласованно дополняют друг друга, и в пределе приводят к подклассам корабельных корпусов с уменьшенными моментами инерции площади действующей ватерлинии (МИДВ).

Для решения означенных задач специально создавался 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 последующими оценками гидростатики, с возможностью построения кривых элементов теоретического чертежа и диаграмм устойчивости в широком диапазоне действующих осадок, дополняемых возможностью теоретических оценок волнового сопротивления, с визуализацией интенсивности зарождающегося корабельного волнообразования вдоль корпуса корабля.

О корректности дифференциальных уравнений качки корабля

В штормовом море принципиально невозможны допущения о малых колебаниях корпуса корабля, так как внешнее воздействие характеризуется склонами до 30° прогрессивных с ударными свойствами, и склонами явно более 45° (теоретически до 60°) для стоячих девятых валов. В таких условиях демпфирование качки забортными киями или активным крыльевыми успокоителями должно восприниматься исключительно в качестве дополнительных внешних возмущающих силовых гидродинамических воздействий.

То есть, традиционные уравнения качки с оценками резонансов должны строиться на сильнейших внешних возмущениях, многократно превышающих демпфирующие реакции по малым колебаниям корпуса, но количественная оценка таких возмущений отчасти возможна лишь по

времени вступления строго определённых силовых импульсов, с совершенно непредсказуемыми величинами штормовых воздействий, которые нередко сопровождаются гидродинамическими ударами по плоским или вогнутым поверхностям бортовой обшивки корабля.

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

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 крыльевых «успокоителях» качки.

В настоящей морской практике прямой вычислительный эксперимент пока представляется единственным инструментальным средством для оценки штормовых мореходных качеств корабля.

Запас остойчивости при формировании обводов в средней части корпуса

Оптимальным вариантом снижения интенсивности качки корабля является предельно возможное снижение начальной метацентрической высоты, отчего возрастает период собственных поперечных колебаний корпуса, и после превышения видимого периода активно действующих морских волн будет ожидать заметное ослабление бортовой качки корабля. Заметим здесь, что правило применимо для кораблей, изначально подго-

товленных к штормовому океанскому плаванию, и может привести к опасности опрокидывания кораблей с обводами более эстетического характера.

Рассмотрим вопросы обоснования означенных мореходных качеств корабля. Максимальная интенсивность бортовой качки ожидается в случае резонансного совпадения периодов бортовой качки корабля и видимых периодов штормовых волн. Ожидаемые характеристики штормового волнения соответствуют навигационно-



Рис. 44. Пассажирский лайнер «Любовь Орлова» без широкой транцевой кормы – обладает плавной качкой с прогнозируемой интенсивностью.

гидрографическим условиям акватории, что позволяет ориентироваться на географические особенности района плавания при проектировании нового корабля, и включаться в региональные наставления мореплавателям для организации эффективных морских коммуникаций.

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

В морской практике мной 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. 44), 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 достаточность остойчивости вверенных им судов, что отвечает уровню морской грамотности и хорошей морской практики по снижению интенсивности бортовой качки.

Определяя необходимость детального рассмотрения ключевых методик по оценкам остойчивости и возможной опасности опрокидывания различных кораблей, необходимо ориентироваться на обоснование возможности поддержания предельно малой начальной остойчивости, что создаёт условия для снижения суммарного силового воздействия штормовых волн в широкой полосе 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.

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 оцифро-

ванных таблиц ординат шпангоутов, в интегрировании по контурам и по шпациям здесь осознанно не применяются криволинейные интегралы, с обязательным сохранением аппроксимационных огрехов метода трапеций.

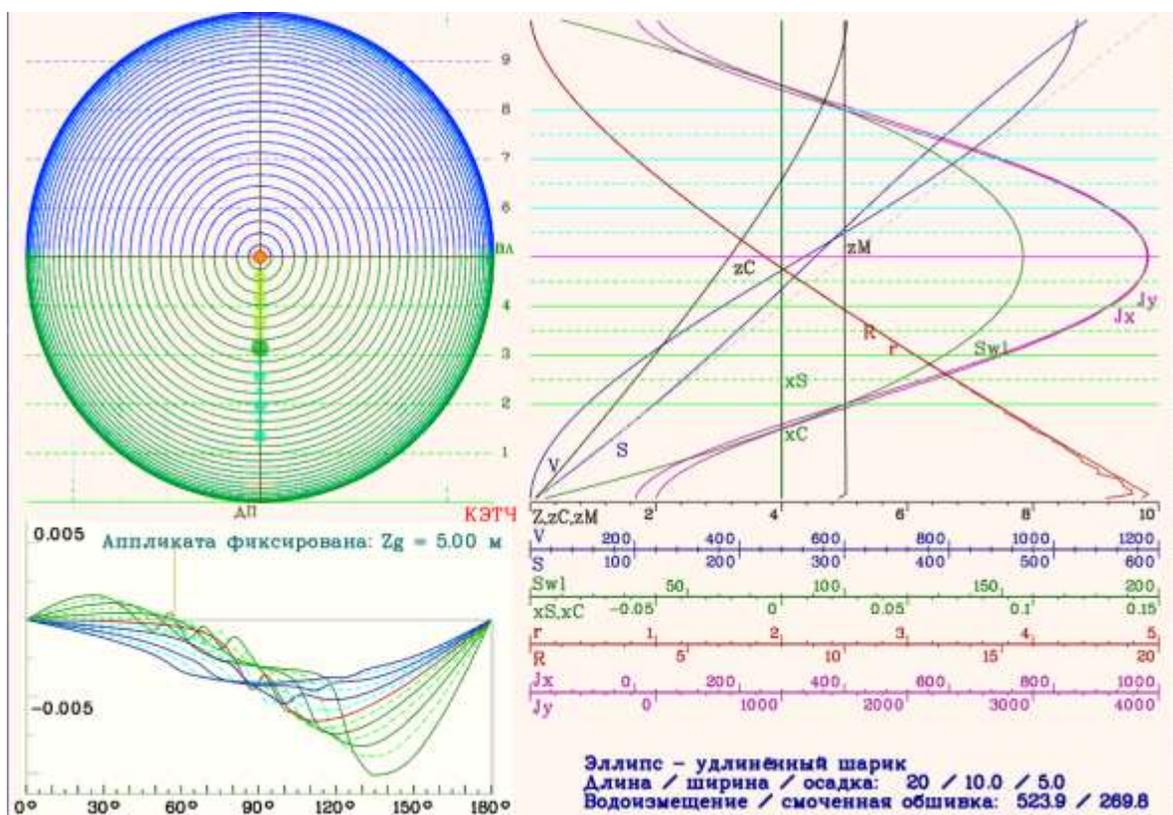


Рис. 45. Диаграммы остойчивости и кривые элементов теоретического чертежа для эллипсоида. Остойчивость (слева-внизу)³³ при фиксированном положении центра тяжести (Z_g) и нулевой начальной метацентрической высоте ($h = 0$); справа кривые элементов теоретического чертежа: z_C [м] – аппликата центра величины; $z_M \equiv 5$ [м] – аппликата метацентра; V [м³] – грузовой размер; S [м²] – смоченная поверхность корпуса; Swl [м²] – площадь действующей ватерлинии; $x_C = 0$, $x_S = 0$ [м] – абсциссы центра величины и центра ватерлинии; r , R [м] – поперечный и продольный метацентрические радиусы; J_x , J_y [м⁴] – моменты инерции площади действующей ватерлинии относительно продольной и поперечной осей корпуса.

³³ Пульсации графиков на диаграммах остойчивости показывают погрешности интегрирования таблиц плазовых ординат методами трапеций. Асимметрия диаграммы в нижнюю полушарность соответствует предустановленной $h = 0$ м.

Так осцилляции на кривых остойчивости для сферических обводов (Рис. 45 – 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.

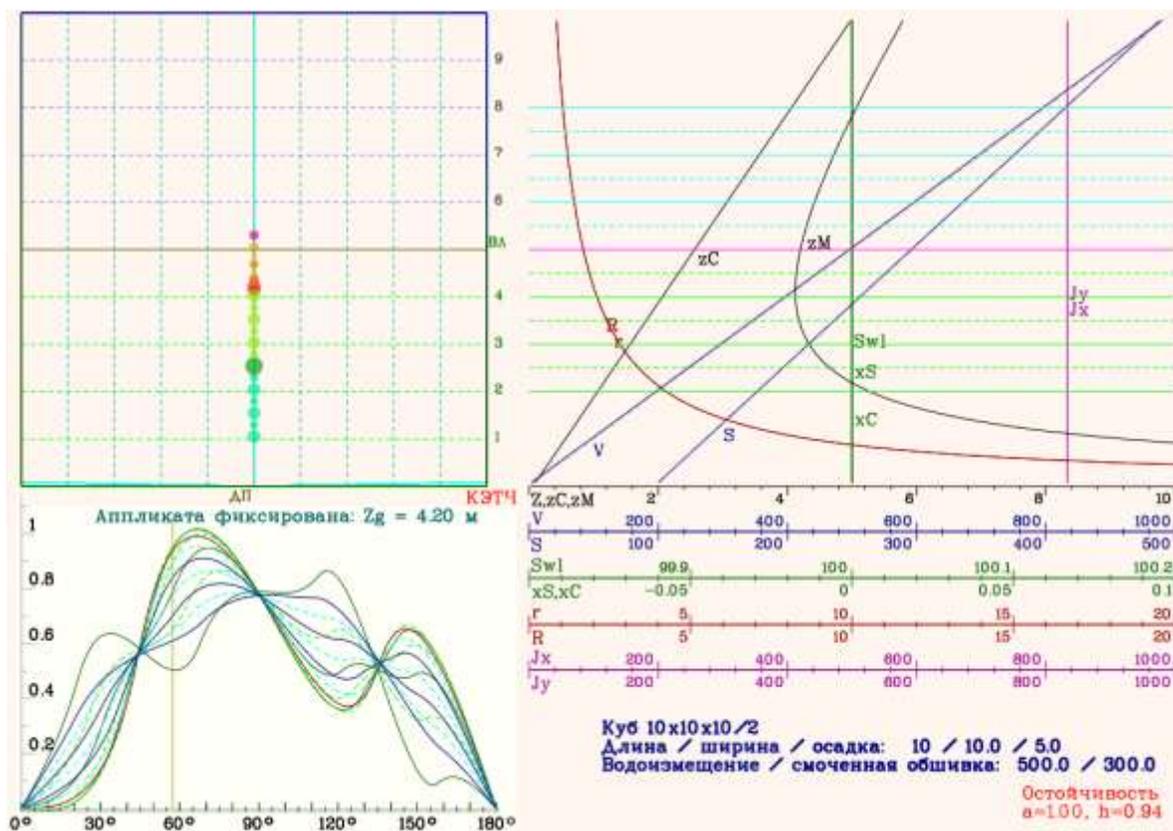


Рис. 46. Контуры корпуса куба (сверху-слева); и его диаграммы остойчивости (слева-внизу) при фиксированном положении центра тяжести (Z_g) и нулевой начальной метацентрической высоте ($h=0$); справа гидростатические кривые элементов теоретического чертежа.

Основное качество корпуса в форме сферы и эллипсоида, так же как и в случае с цилиндром, это неизменность положения поперечного мета-

центра при любых углах крена и при любых изменениях осадки корпуса. На двух диаграммах остойчивости для нулевой начальной остойчивости $h = 0$, и для малой метацентрической высоты $h = 1$ см хорошо видно фактическое отсутствие восстанавливающих моментов формы корпуса, и так же как и независимость поведения этих кривых во всём диапазоне осадок. Формально это означает полное отсутствие внешних гидростатических сил при плавании на волнении любой интенсивности, если на корпусе не будет выступающих частей, а трение для касательных компонент обтекающих потоков считается пренебрежимо малыми.

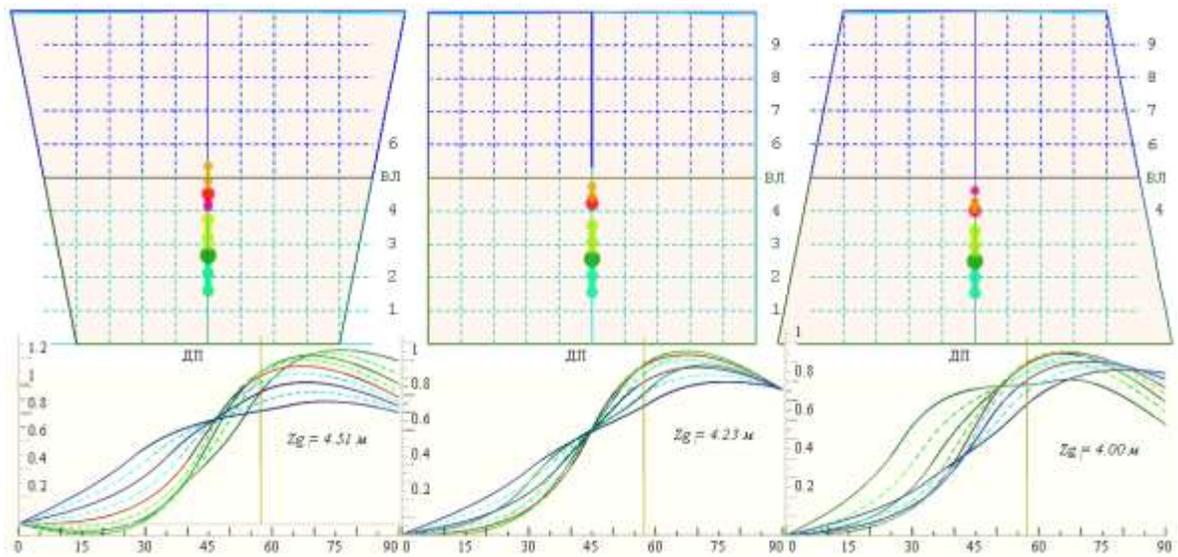


Рис. 47. Варианты расчетов остойчивости формы корпуса для развала борта – слева; вертикальных бортов – по центру; и завала бортов – справа. Диаграммы построены для фиксированного положения центра тяжести (Z_g) и нулевой начальной метацентрической высоты ($h=0$) при посадке по конструктивной ватерлинии №5. На диаграммах уменьшен до 40% диапазон расчётных осадок: №3÷4 – на всплытие, и №6÷7 ватерлиний – на погружение корпуса при вертикальной качке.

Диаграммы остойчивости куба (Рис. 46) 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 цен-

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

Важное замечание относительно влияния любого изменения осадки на обретение положительной величины метацентрической высоты, что как бы взаимокompенсирует 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 (Рис. 47), что в случае развала борта на уровне действующей ватерлинии, остойчивость формы корпуса в условиях вертикальной качки ухудшается при всплытии над волнами, и возрастает при частичном погружении. В случае с завалом борта иначе, остойчивость заметно улучшается при подвсплытии корпуса, и немного ослабевает при погружении. То есть, существует оптимальная величина завала борта, при которой минимальная величина начальной метацентрической высоты приходится на действующую ватерлинию и всегда возрастает при любом изменении осадки, что определяется возвышением метацентра над центром величины по метацентрическому радиусу, вычисляемому по отношению момента инерции площади действующей ватерлинии к водоизмещению: $r = Jx/W$ [м].

Рис. 45 с гидростатическими расчетами для чистого эллипсоида показывает независимость метацентрической остойчивости от текущей посадки корпуса. Спряменение с уменьшением кривизны контуров шпангоутов на уровне действующей ватерлинии служит улучшению характеристик штормовой остойчивости, в том числе при нулевой начальной метацентрической высоте. Усиление выпуклости с усиленной кривизной бор-

та, 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.

Плоский вертикальный борт также близок к оптимуму с возможным достижением абсолютной остойчивости в условиях вертикальной качки. Но всё же, с учётом естественного развала шпангоутных контуров на уровне действующей ватерлинии в оконечностях корпуса, для компенсации негативных эффектов целесообразно усиливать завал борта в средней части корпуса.

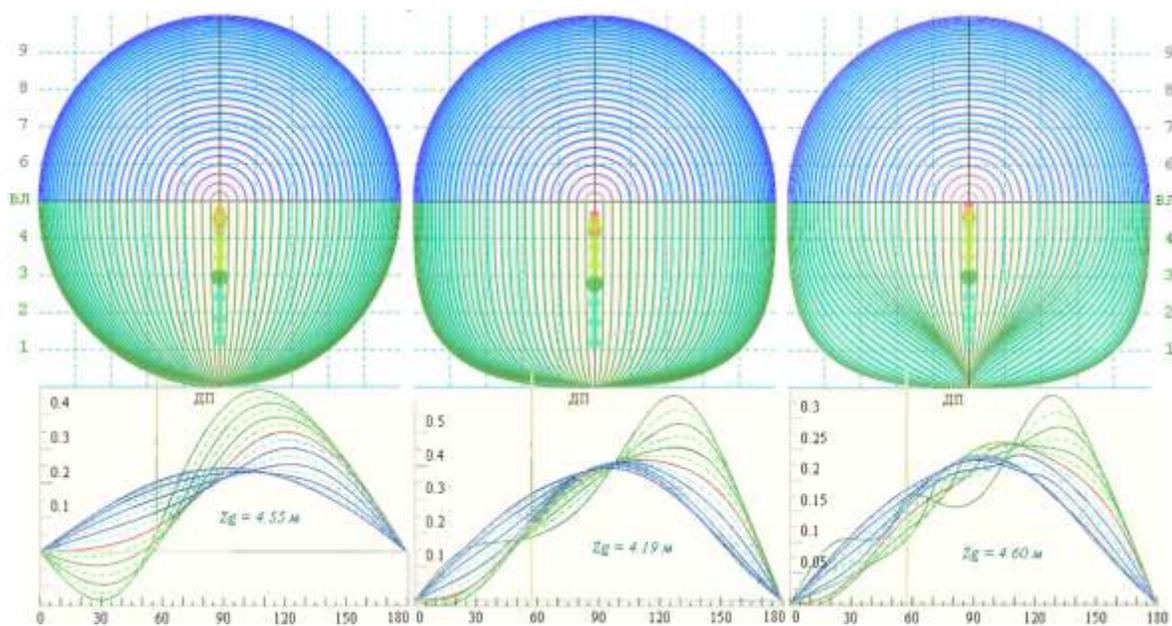


Рис. 48. Вариант расчетов остойчивости формы корпуса без влияния надводного борта – слева; корпуса кубической полноты со «струйной системой»³⁴ обтекания – в центре; клиперским скуловым гашением корабельных и внешних штормовых волн – справа. Все диаграммы с фиксированным положением центра тяжести (Z_g) с нулевой метацентрической высотой ($h = 0$); по осадкам: $2 \div 4$ – на всплытие, и $6 \div 9$ на погружение корпуса в условиях вертикальной качки.

³⁴ Илья Павлович Алымов. **Морской сборник**, 1879, №9, с.1÷54, №10, с.1÷52: «Очерки системы струйного образования судов и исследование опыта применения систе-

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

Возвращаясь к рассмотрению обводов корпуса, оставляем надводную часть эллиптической формы (Рис. 48), 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. 48, слева). Получаем, что у округлого корпуса сохраняется проблема ослабленной остойчивости формы ($h = 0$) при всплытии корпуса над впадинами штормовых волн. Характерная форма корпуса подводных лодок в надводном положении в таком случае может способствовать усилению бортовой качки, при этом запас остойчивости можно считать абсолютным, а судно с таким корпусом принципиально не может быть опрокинуто кверху килем. Для формального устранения отрицательной начальной остойчивости на всех осадках от второй до 9 ватерлинии (*всплытие 60%, 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» [Морской сборник, 1879], плохо сказывающейся на ходкости, вертикальной и продольной качке корабля в штормовом плавании. Решение проблемы обеспечивается построением скуловых обводов в оконечностях с заострёнными книзу V-образными или клиперскими скуловыми шпангоутами (Рис. 48, справа). В клиперских обводах также немного увеличиваются плечи восстанавливающих моментов при подвсплытии корпуса, и для исключения остаточного неположительного фрагмента диаграммы остойчивости достаточно 1 см метацентрической высоты.

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

Геометрические особенности обводов корпуса и оценки запаса остойчивости корабля

Показательно сопоставление исторических проектных решений в построении корабельных обводов, с настоящими видениями эстетического

формирования общекорабельной архитектуры, на фоне перспективных установок целевого проектирования с использованием эволюционного согласования и совершенствования гидромеханики штормовой ходкости корабля.

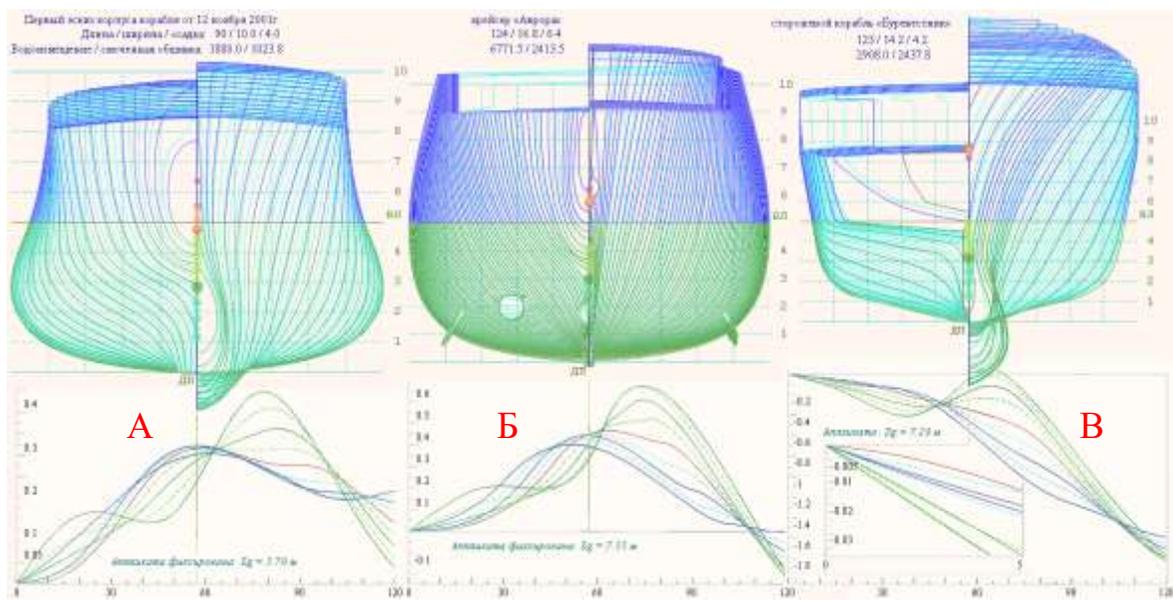


Рис. 49. Изображены три варианта проекции корпус для теоретических чертежей с диаграммами остойчивости формы корпуса кораблей, ниже, для различных осадок при фиксированных положениях центра тяжести (Z_g) и нулевой начальной метацентрической высоте ($h=0$): **A**-«Корвет» – корабль повышенной штормовой мореходности; **Б**-«Аврора» – исторический прототип корабля, как образец морской грамотности и хорошей морской практики в проектировании корабельных обводов; **В**- «Буревестник» – современный корабль с традиционным сильным развалом борта и развесистыми ветвями надводных шпангоутов. Красная кривая на диаграммах остойчивости соответствует конструктивной осадке ВЛ №5, зеленые по ватерлиниям №3÷4 – при всплытии, и синие №6÷7 – при погружении в динамическом процессе в условиях вертикальной качки.

Особенности формы и распределения площадей под кривыми на диаграммах остойчивости для различных осадок (Рис. 49) характеризуют запас остойчивости в качестве весьма важных характеристики корабельных обводов и формы корпуса в целом. На теоретических чертежах корпуса и диаграммах Рида для трёх кораблей показываются особенности измене-

ния устойчивости в походном состоянии с фиксированным положением аппликаты центра тяжести, соответствующей нулевой метацентрической высоте на рабочей осадке.

Площадь под диаграммами устойчивости становится характеристикой запаса устойчивости формы корпуса при динамически изменяющейся в штормовом плавании осадке, и, соответственно, спрямленный пучок диаграмм устойчивости 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 устойчивости корабля по периодам собственных поперечных колебаний будут получаться всё более обнадеживающими.

В океанских походах крейсер «Аврора» нагружался под типовую эксплуатационную величину метацентрической высоты, судя по историческим источникам³⁵, 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 устойчивостью. 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 задействию по назначению всех бортовых устройств, механизмов и вооружений поддерживалось всегда. Крейсер позволяет временно выбирать режим хода относительно шторм-

³⁵ Костенко В.П. На «Орле» в Цусиме. Л.: Судостроение, 1968. 525 с.

мовой 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.

Свойственные В-«Буревестнику» факторы недостаточной мореходности будут проявляться и по части его гидромеханики в условиях морского волнения, усиливаемые наличием бортовых килей с большекрыльями 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 одного «рычага»? Точка перегиба с небольшим завалом борта на уровне действующей ватерлинии способствуют положительной остойчивости корабля даже при нулевой начальной метацентрической высоте, как условие плавной аперiodической качки. Отличительной особенностью остойчивости перспективного корабля А-«Корвет» отмечается быстрое восстановление положительной величины метацентрической высоты и действующих плеч остойчивости при любых изменениях посадки, также как и при относительно больших углах накренения.

Неожиданно почти такой же эффект, но чуть менее выраженный, наблюдается у крейсера Б-«Аврора», что можно признать неким чудесным провидением или особой морской грамотностью старшего кораблестроителя крейсера 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 предостережений, которые можно было бы отметить в наставлениях мореплавателям.

Можно предполагать, что подтверждается в опытовых 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 отрицательной остойчивости формы корпуса при S-образных диаграммах будет обнаруживаться постоянным или длительным накрениением 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. 49-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 которой 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»³⁶ предельно малыми ходами, что единственно допустимо для ко-

³⁶ 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 $1\div 2$ румба ($15\div 20^\circ$) возникают мощные и опасные удары скулового слеминга.

раблей с развесистыми надводными ветвями носовых шпангоутов и широким транцевым подзором в корме.

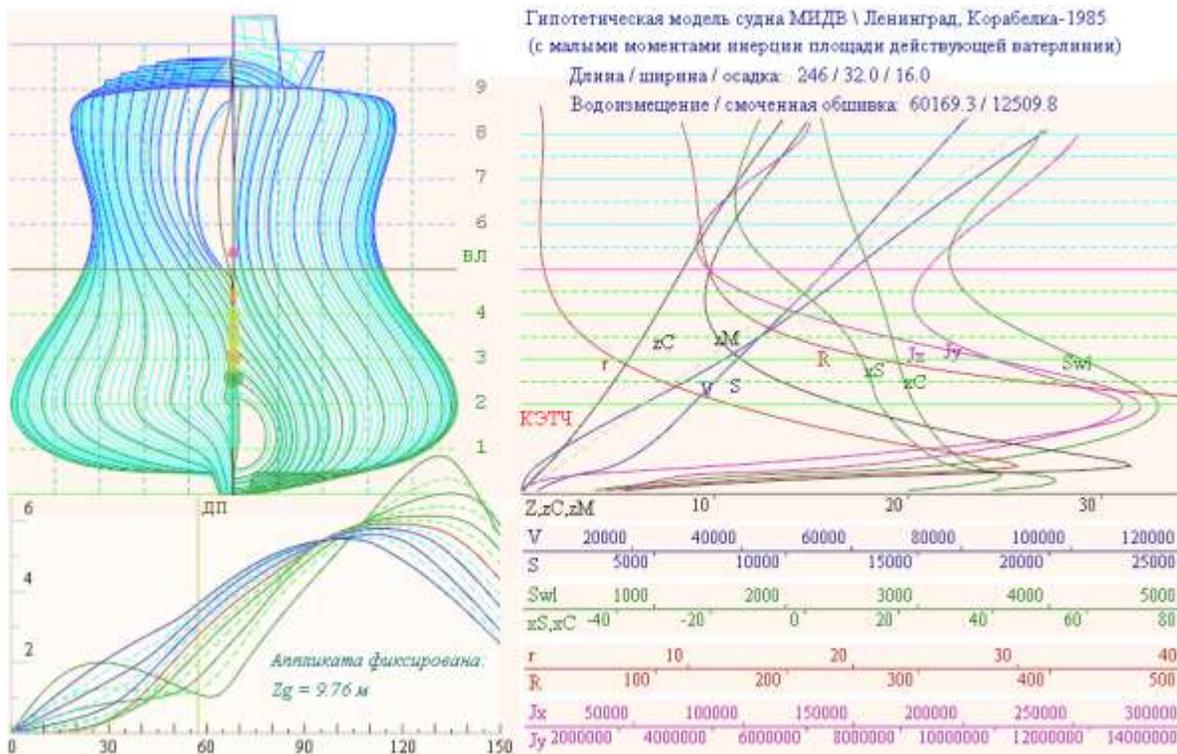


Рис. 50. Гиперболизированная относительно традиционных обводов модель корабля с малыми моментами инерции площади действующей ватерлинии (МИДВ-85), построенная и оснащенная телеметрическим оборудованием в 1985 году для сравнительных мореходных испытаний в гравитационной буксировочной системе на регулярном волнении в опытовом бассейне кафедры теории корабля Ленинградского кораблестроительного института.

Именно эта модель 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.

Первые оценочные опыты с малыми моделями судов выполнялись в морских походах из Калининграда, Севастополя и Владивостока, затем при небольшой 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 смещенным к носу центром величины погруженного в воду корпуса МИДВ-85 (Рис. 50).

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 воззрениям 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 доцусимских наставников.

Модель МИДВ-85 участвовала в штормовых мореходных испытаниях в гравитационной буксировочной системе на регулярном волнении опытового 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 быст-

роходного 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.

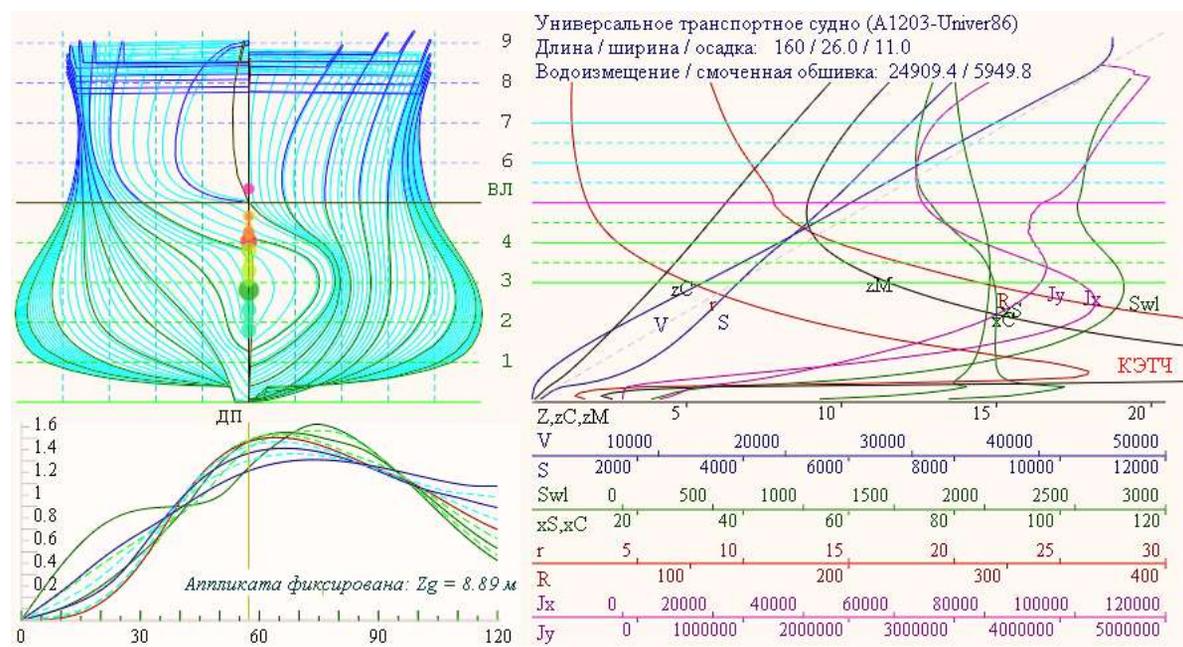


Рис. 51. Вариант расчёта гидростатических кривых и диаграмм остойчивости гипотетического транспортного судна. При нулевой начальной остойчивости на конструктивной осадке внешние кренящие моменты малы практически до 25° волнового склона. Диаграммы остойчивости показывают заметный рост метацентрической высоты при любом изменении посадки в условиях интенсивной вертикальной качки.

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. 19) в варианте универсального транс-

портного судна (Univer-86³⁷) 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 (Рис. 51), что обеспечивает предельно плавную бортовую качку; с попутным снижением корабельного волнообразования на промежуточных скоростях хода $Fn \approx 0,3 \div 0,4$ в зоне последнего минимума на кривых волнового сопротивления, где по гипотезе возвратных волновых реакций ожидается снижение силового воздействия на корпус от соразмерных штормовых волн.

В предварительных заключениях попробуем вкратце проанализировать наметившиеся концептуальные предпосылки к проектированию обводов корпуса в свете предопределения мореходных качеств корабля с помощью особого построения 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 опытовые эксперименты с оптимизированными обводами корабля повышенной штормовой мореходности, и, впоследствии, в

³⁷ «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

1985 году, в ходе технико-исторических апробаций мореходных качеств исторических корабельных обводов (Рис. 50), на базе мореходного опытового бассейна кафедры теории корабля Ленинградского кораблестроительного института отчасти были отработаны ключевые концепции оптимального проектирования корпуса и общекорабельной архитектуры в согласии с настоящими целевыми показателями непротиворечивого проектирования корабля повышенной штормовой мореходности.

Корабельные изыскания без задействования современной вычислительной техники исторически строились на основе опытовых экспериментов с моделями кораблей морской практике судоводителей, с последующими чисто практическими обоснованиями гидромеханики качки и ходкости на основе гидростатических формализаций давления воды на смоченной обшивке корабля, с вовлечением анализа по корпускулярным моделям Ньютона с учетом кинематики потоков и давлений по Бернулли для потоков жидкости у борта и в зоне винто-рулевого комплекса. Знание процессов гидромеханики корпуса, руля и движителей является основой морской грамотности и хорошей практики в моменты быстрых принятий решений по маневрированию корабля в сложных условиях плавания, при прохождении узкостей, на швартовках на ходу в открытом море или у причала, с учетом ветров и течений.

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

стройкой на особенности крутых девятых валов или крупной зыби, без усиления или турбуликации локальных .

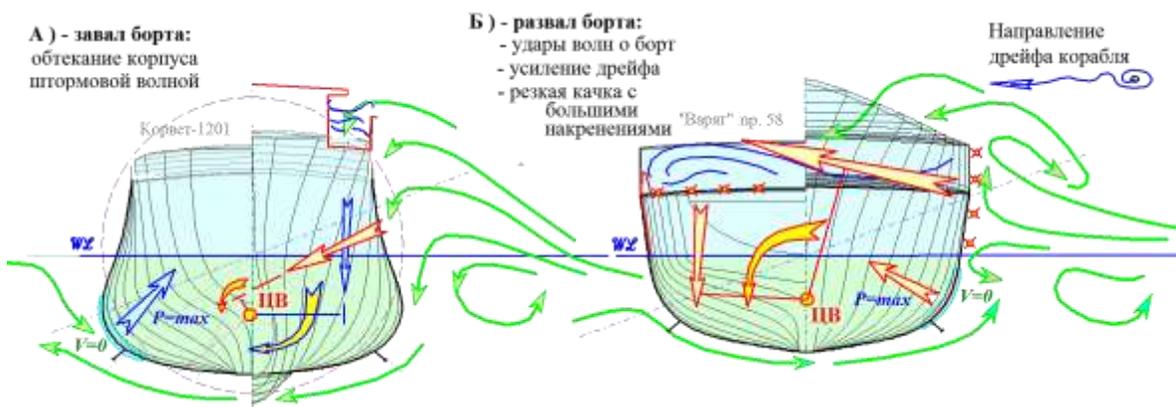


Рис. 52. Характер гидродинамического воздействия морского волнения на корпус корабля показывает различия в перераспределении кренящих гидродинамических пар сил и моментов: А) – перспективного, слева, и Б) – современного, справа кораблей. Кренящий момент от прямого воздействия волнового гребня на надводный борт А) компенсируется завалом борта, а длинная вдолькорпусная надстройка на верхней палубе и бортовые кили способствуют компенсации остаточного кренящего момента. В случае развала бортов Б) все кили и распределение давлений в подводной части корпуса усиливают кренящий момент под воздействием морского волнения, а возникающий дрейф усугубляет лишь негативный эффект. В целом, по схеме А) достигается полная компенсация кренящих моментов, по схеме Б) – все внешние пары сил действуют в сторону образования крена на подветренный борт.

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.

По мере рассмотрения результатов вычислительных экспериментов уместно возвращаться к ранее запатентованным проектным решениям, соз-

дающим 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»³⁸ определяет особенности формы корпуса корабля, способствующие взаимокompенсации всех внешних сил волновой природы при их одновременном и всестороннем воздействии на корпус и палубы корабля. Целевое непротиворечивое проектирование корабля (Рис. 52, А) – всестороннее согласование гидростатики и гидромеханики штормового хода корабля с минимальным или скомпенсированным внешним силовым воздействием. В случае (Рис. 52, Б) – все внешние силы действуют на усиление опасности, а необходимость «безмерного» увеличения начальной устойчивости грозит мгновенным опрокидыванием под резонансным влиянием штормовых волн.

Небольшое уточнение проектных решений по обводам корпуса выполнено в 2011 году. Результаты серии мореходных испытаний телеуправляемых моделей судов с проектными предпосылками о достижении наилучшей штормовой мореходности обоснованы и представлены к практической реализации в документации по патенту России³⁹: «Корабль, устойчивый в штормовом плавании».

³⁸ «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

³⁹ «Корабль, устойчивый в штормовом плавании». Храмушин В. Н. Патент № 2487043 (СахГУ). Бюл. № 2. от 20 января 2013 г. Рег.№ 2011129192, от 12.07.2011 г. (составлено 2011-01-17, решение о выдаче патента от 2012-11-01). ShipDesign.ru/Invent/06.html

Современный корабль (Рис. 52, Б) с сильным развалом борта практически полностью отражает набегающую на борт волну, при этом с подветренного борта наблюдается фактически тихая вода. При этом на наветренном борту проявляется сильнейшая интерференция между набегающими и отраженными от борта корабля свежими или штормовыми волнами, тем самым наглядно показывая механизм образования интенсивной бортовой качки. В гидромеханике взаимодействия это свидетельствует о полном силовом восприятии многотонного импульса из быстрого гребня волны, без компенсаций восстанавливающими моментами от пар сил по надводному борту с упором на центр подводного бокового сопротивления, усиливаемыми образованием сильного бокового дрейфа, превращающего бортовые и днищевые кили в паразитные выступающие части.

Корпус корабля с завалом борта (Рис. 52, А) подтормаживает штормовую волну на уровне подошвы, создавая гидродинамические условия для затягивания трохoidalного вихря под днище корабля, одновременно перенаправляя вниз вектор суммарного действия волновых сил. В эксперименте наблюдается чистый проход волны сквозь корпус корабля без видимых трансформаций, а вместо интерференции с отражаемыми волнами по наветренному борту, чаще проявляется обрушение гребней на небольшом удалении после прохождения за борт подветренный, что подтверждает незначительное искажение формы и интенсивности проходящей через корпус волны, а также наличие малозаметной дифракции волновых гребней после обхода оконечностей корпуса корабля.

Интенсивный поток воды из волнового гребня под корпусом корабля приводит к перераспределению гидродинамических давлений, и в случае относительно слабого дрейфа отметка нулевой (критической) скорости смещается 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. 52, слева) может остановиться, к примеру, у подветренного борта, оставляя за этим бортовым килём только вязкое сопротивление ходкости корабля. Тогда кили на днище и с противоположного послужат слабой компенсации качки, а иначе, если скорость дрейфа сильнее потока воды под днищем, то все кили и другие подводные выступающие части корпуса служат только опасному усилению углов крена при бортовой качке.

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

Завал и вогнутость борта в средней части корпуса образуют ярко выраженную S-образность диаграмм остойчивости, что создаёт возможность и востребует для контроля остойчивости корабля по факту обнаружения затянувшихся по времени 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 штормового волнения и ветра.

В случае развала бортов мореплаватели должны искусственно создавать и контролировать поддержание резкой качки с большим размахом углов крена, что достигается завышением метацентрической высоты – большого рычага для сильных воздействий на склонах крупных волн. Величина метацентрической высоты для корабля с развалом бортов будет регулироваться углами заката диаграммы остойчивости, и для достижения таких ограничений порядка 60° метацентрическая высота будет превы-

шать $1,5 \div 2,5$ метра. При характерных корабельных размерениях периоды собственных колебаний такого корпуса будут резонировать со свойственными для морских и прибрежных акваторий периодами штормовых волн порядка $6 \div 10$ секунд. Учитывая, что наличие развесистого развала шпангоутов проявляется снижением углов заката диаграммы остойчивости (естественное положение корпуса – кверху килем), возникает опасность опрокидывания корабля за счет резкого и усиленного размаха по максимальным углам крена на бортовой качке. Либо корабль лишается основного предназначения, так как на свежем волнении придётся вынужденно уходить с заданного маршрута в режим штормования носом на волну с предельно малыми скоростями хода.

В проведении мореходных испытаний с моделями со специально отработанными обводами, на фоне малых углов крена у опытовой модели начинает хорошо проявляться динамика вертикальной качки, собственные периоды которой эмпирически оцениваются аналогами капитанской формулы как $\tau_{\zeta} \approx 2,5 \cdot \sqrt{T}$ [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»⁴⁰, где систематизированы вышеприведённые заключения о

⁴⁰ «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

наилучшем варианте формы мидельшпангоута с точкой перегиба и небольшим завалом борта на уровне конструктивной (действующей) ватерлинии, с упоминанием предпочтительном устройстве заострённой кормовой оконечности выше ватерлинии, или – в виде крейсерской кормы.

Экспериментально все технические решения многократно проверялись с различными малыми моделями судов в периоды работы на море в Калининграде, в Севастополе и во Владивостоке, где в основном отрабатывались технические решения по ходкости, килевой и бортовой качке. Заключительным подтверждением возможности практически полного исключения бортовой качки⁴¹ в опытовом бассейне Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Соответственно, в вышеозначенных патентах представлена и обоснована расширенная гидродинамическая трактовка остойчивости корабля на интенсивном морском волнении (Рис. 52), когда гидростатические силы и моменты корректируются перепадами давлений под действием быстрых потоков воды вблизи смоченной бортовой обшивки корабля.

В целевом проектировании корабля возникают существенно различающиеся требования по предназначению и мореходным качествам корабля. В дополнение к схемам формирования средней части корпуса корабля, рассмотрим и проанализируем три различающихся примера обводов и корпуса корабля в целом:

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

⁴¹ ShipDesign.ru/Invent/2003-11-01_Ship_with_small_rolling_on_heavy_waves_in_towing_tank.mp4
Гидродинамическая компенсация бортовой качки корабля на крупном волнении. *Корабль маневрирует малыми ходами или штормует без хода в моменты приведения на новый курс относительно регулярного волнения в опытовом бассейне (совершенно неожиданное достижение полной компенсации бортовой качки для всех режимов плавания в условиях предельно крупного волнения). 21,5 Мб.*

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

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

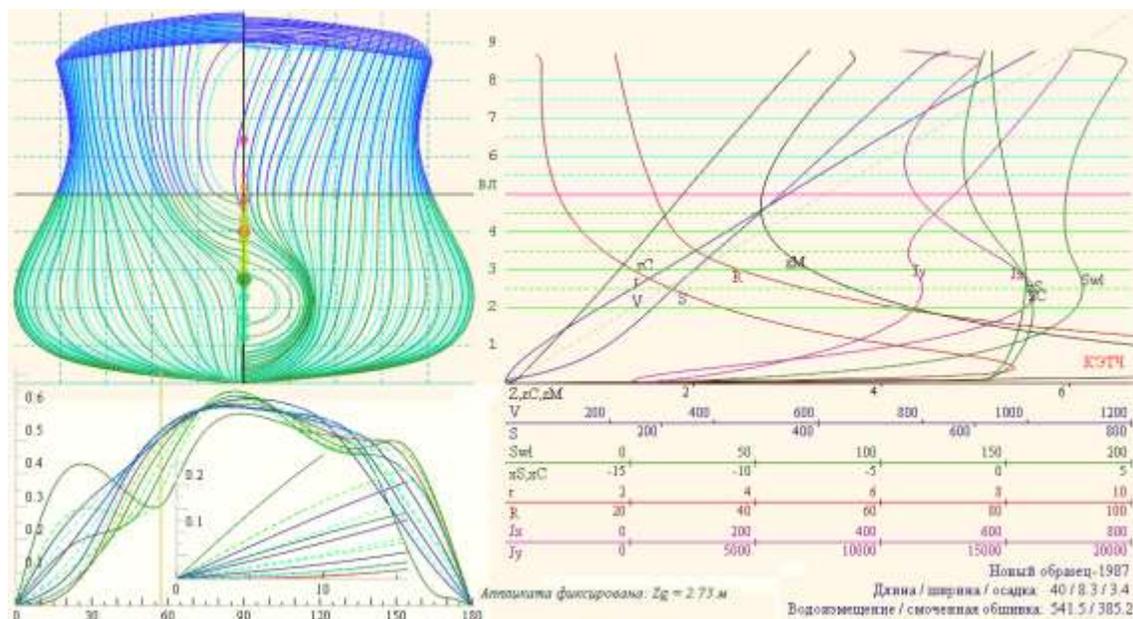


Рис. 53. Var.1) – гидростатические характеристики модели корабля «Early-1987», построенного по результатам обобщения серии мореходных экспериментов в опытном бассейне кафедры теории корабля Ленинградского кораблестроительного института в 1985 году.

Корпус корабля (Рис. 53) с шифром «Early-1987» строился в качестве обновлённой компромиссной модели по результатам сравнительных опытовых экспериментов с моделью гиперболизированного корабля «МИДВ-1985», с лучшим согласованием оптимизационных недочетов проекта корпуса универсального транспортного судна Univer-86.

Доработка проекта «Early-1987» проводилась с повышенных требованиями к снижению корабельного волнообразования на средних скоростях с числами Фруда порядка $Fn \approx 0,35 \div 0,45$, так как в ходовых испыта-

ниях «МИДВ-1985» на указанных скоростях наблюдался чётко выраженный гребень расходящейся корабельной волны излишней высоты. С этой целью в оконечностях устраиваются поверхности плавного закручивания набегающего потока от форштевня под днище, что соответствует формированию бульбового форштевня с условно клиперскими или V-образными обводами в носовой и кормовой оконечностях.

Задача ходкости и минимизации всех видов качки успешно достигнута, о чем будет многократно упоминаться в 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 восстанавливающего плеча на конструктивной осадке до углов крена порядка 20° , но при любом изменении посадки, например на волновых склонах, быстро восстанавливается положительная поперечная остойчивость. На врезке внутри диаграмм остойчивости (Рис. 53) 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.

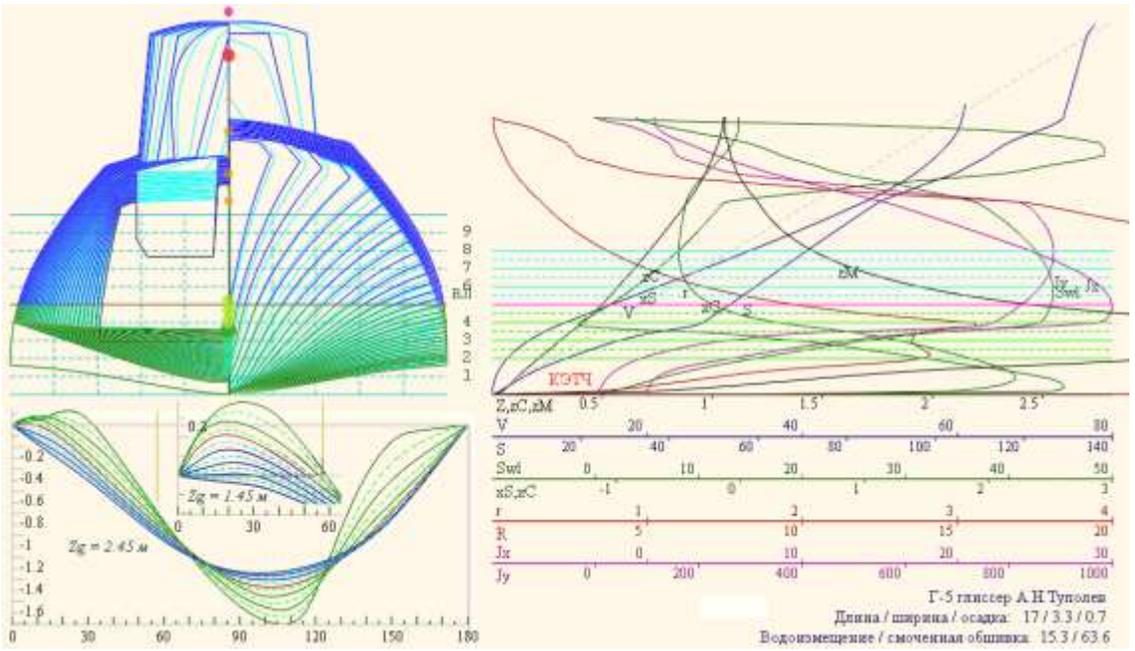


Рис. 54. Var.2) – остойчивость формы и кривые элементов теоретического чертежа (КЭТЧ) торпедного катера типа «Г-5» проекта ЦАГИ 1928 года.

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. 54) должна оцениваться из гидродинамических принципов. Катер Г-5 легко встает на редан и при циркуляции на огромных скоростях более 50 узлов ($Fn \approx 2$) не проявляется опасности опрокидывания, хотя удары волн о плоское днище за реданом достигают предельных величин с интенсивной вибрацией всего корпуса.

Гидростатической остойчивостью формы ($h=0$) катер Г-5 не обладает. На врезке над диаграммами остойчивости формы (Рис. 54) приведен фрагмент для начальной метацентрической высоты $h = 1$ м. Тогда угол заката получится около $\vartheta_v^\circ \approx 50^\circ$, максимальное плечо восстанавливающего момента $l_{max} = 20$ см при крене порядка $\vartheta_M^\circ \approx 20^\circ$. При небольшой ширине корпуса $B = 3,3$ м метацентрическая высота $h = 1$ м считается от-

носителем 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 ϑ_f° .

Для катера «Г-5» такое свойство малой остойчивости также объясняется относительно малой осадкой, при этом, как уже показывалось ранее (Рис. 48), 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. 55), широко вовлеченной в отработку вопросов мореходности корабля на международных научных форумах⁴² кораблестроителей. В противоположность сделанным выше заключениям (Рис. 49) 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 вы-

⁴² ONR 5613 Tumblehome Ship (ONRT), preliminary design of a modern surface combatant, Tokyo 2015 A Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics, Wageningen 2023: a Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics

пуклости с образованием максимальной ширины и момента инерции площади точно на конструктивной ватерлинии.

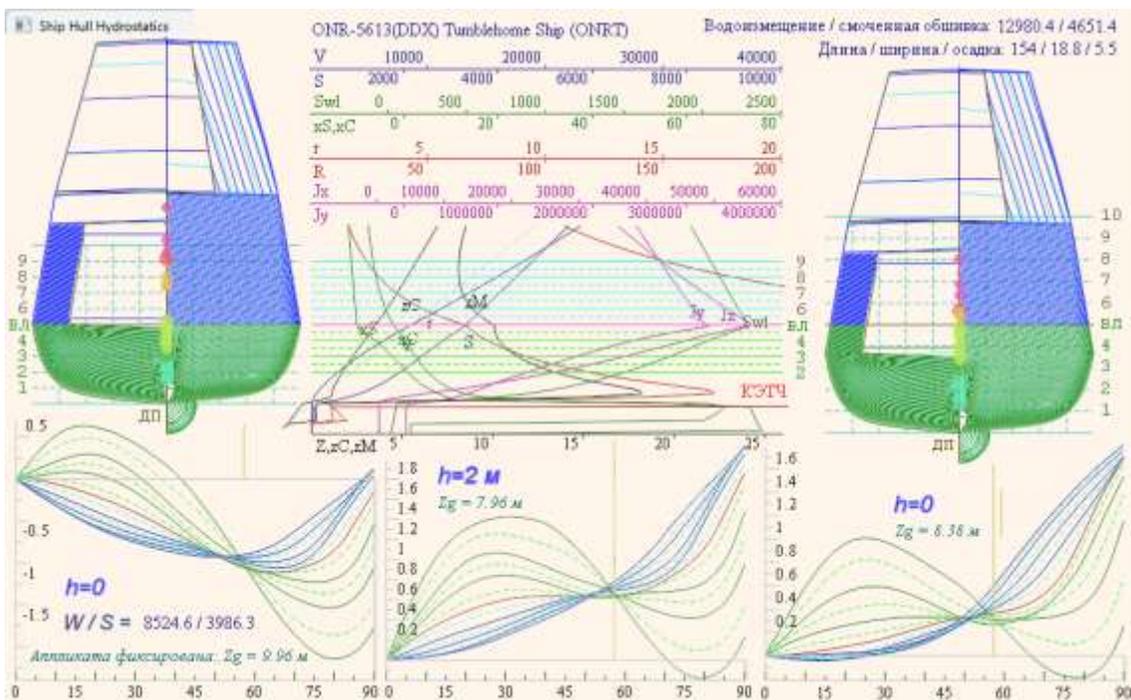


Рис. 55. Гидростатические характеристики и диаграммы остойчивости корабля «ONR-5613 Tumblehome ship». Левый чертеж по конструктивной осадке, под ним диаграммы остойчивости при $h = 0$, правее по центру те же диаграммы при $h = 2$ м. Справа тот же корабль с осадкой на два метра большей, с диаграммами остойчивости формы корпуса $h = 0$.

На гидростатических кривых образуются острые сломы на 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 восстанавливающего момента снижается до $L_{max} \approx 0,5$ м, вчетверо меньше начальной метацентрической высоты $h = 2$ м.

Вся кормовая часть корабля имеет одинаково плоское днище, без скулового перехода для выравнивания потока в зоне движителей и за

кормой корабля. При подвсплытии включается небольшой фрагмент положительной начальной остойчивости, что объясняется быстрым уменьшением водоизмещения по выходу из воды транцевой кормы с почти плоским подзором. Ожидаемой обманки с S-образностью диаграммы начальной остойчивости за счет широкого транца не наблюдается, что лишь усугубляет негативные особенности корпуса по ударным нагрузкам – кормовому слемингу на ходу по волне, с опасными штормовыми захватами широкой кормы гребнями волн.

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

Корабельное волнообразование – отражение штормовых волн от корпуса корабля

Выше, для средней части корпуса корабля проводились обоснования к использованию завала борта с перегибом контуров шпангоутов на уровне действующей ватерлинии, что воспроизводило сопутствующее уменьшение ширины B [м] и поперечного момента инерции J_x [м⁴] площади действующей ватерлинии. В качестве исходной геометрической предпосылки уместно полагать, что аналогичная концепция по уменьшению продольного момента инерции площади действующей ватерлинии поспособствует

умерению килевой качки корабля на крупном штормовом волнении. Однако, на практике такой геометрический эффект становится положительным при весьма непростых доработках. Периоды собственной килевой оцениваются как $\tau_{\psi} \approx 2,4 \cdot \sqrt{T}$ [сек] и вертикальной как $\tau_{\zeta} \approx 2,5 \cdot \sqrt{T}$ [сек] качки корабля, где T [м] – осадка, не особо велики. Это означает существование достижимой скорости хода относительно гребней и видимых фронтов штормовых волн, при которых резонансные явления неизбежны.

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

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

С некоторыми оговорками, обе гидромеханические задачи разрешаются в процессе кинематической интерпретации корабельного волнообра-

зования, 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 взаимокompенсация 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 взаимокompенсации 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 килевой качки корабля.

В математической классике по Мичеллу-Кочину рассматриваются только волновые импульсы отражения встречного потока по условиям непротекания корпуса корабля, без добавления в математическую модель пульсаций давления за счет касательных компонент скоростей течений воды вблизи корабельной обшивки. В расчетах также не используется проседание ватерлинии 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 сопоставимых 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 прохождения 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

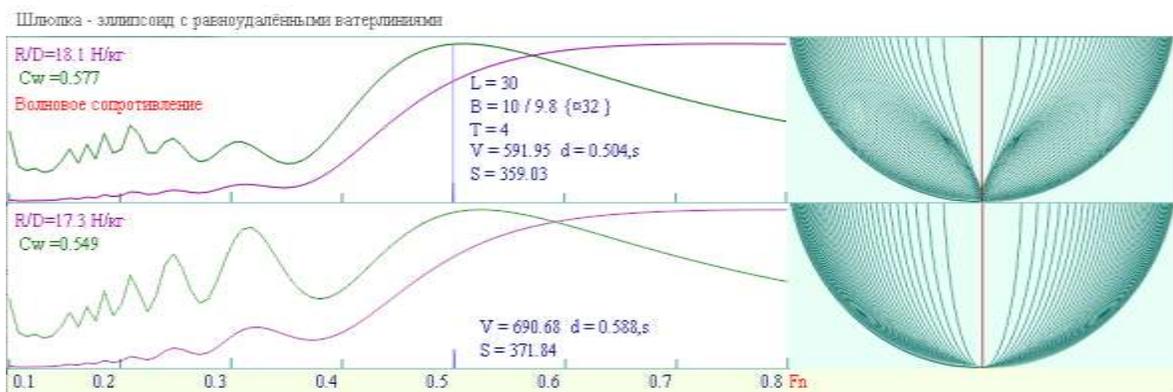
распределения которых по смоченной обшивке определяется исключительно геометрическими особенностями формы корпуса.

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 развала бортов интенсивность корабельного волнообразования и удельное волновое сопротивление также снижается. Последнее возможно вследствие меньшего коэффициента продольной полноты корпуса, или по причине потери точности вычисления интегралов Мичелла на нулевом уровне – в полосе действующей ватерлинии. Вопрос академический и не влияет на оценочные выводы по форме корпуса корабля. В реальной гидромеханике имеют значение ходовой дифферент с искривлением ватерлинии под действием быстрых потоков вблизи судовой обшивки.

Весьма неожиданно, но именно расчеты корабельного волнообразования и волнового сопротивления с использованием интегралов Мичелла особо чувствительны к оценкам различия гидромеханики клиперских об-

водов с «системой струйного обтекания». Для малого миноносца типа «Касатка» со «струйной системой обтекания» подтверждается 2÷3% снижения удельного волнового сопротивления на предельно больших скоростях хода $Fn > 0,5$, где существенна лишь форма мидельшпангоута, а выигрыш сопоставим с величиной коэффициента продольной полноты корпуса, и не зависит от явных нарушений в гидромеханике плавных и безотрывных потоков в зонах скуловых обводов в оконечностях.



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

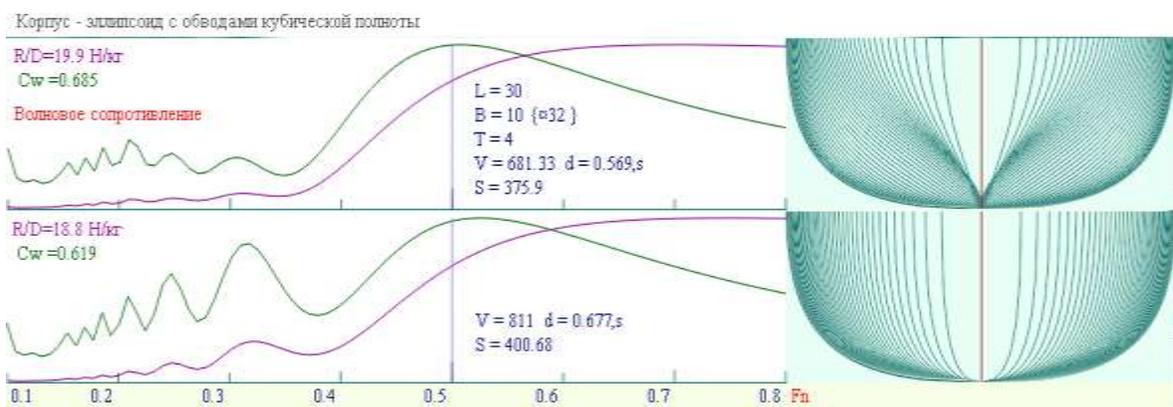


Рис. 56. Полнота корпуса 3-й степени. Предпоследний экстремум по $Fn \approx 0,32$, так же как и для меньших скоростей хода, проявляются усилением интенсивности килевой и бортовой качки под воздействием соизмеримых по длине штормовых волн.

Для меньших скоростей хода (Рис. 56) 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.

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		C_w -клипер		C_w -струйный	
0,5	13,75	15,32	12,1	13,16	0,577	0,685	0,549	0,619
0,36	1,629	1,393	2,941	3,008	0,138	0,137	0,236	0,254
0,31	1,991	1,791	4,325	4,7	0,219	0,212	0,483	0,52
0,27	1,086	0,995	1,557	1,316	0,144	0,144	0,36	0,229
0,25	1,267	1,194	2,422	2,256	0,231	0,233	0,225	0,409
Форма δ	округл. 0,504	3 ^ш -ст. 0,569	округл. 0,588	3 ^ш -ст. 0,677	округл. 0,504	3 ^ш -ст. 0,569	округл. 0,588	3 ^ш -ст. 0,677
$R_{масштаб}$	18,1	19,9	17,3	18,8	-	-	-	-

В практике проектирования кораблей Военно-морского флота России по-видимому недооцениваются полезные свойства «английских клиперских» V-образных скуловых обводов в угоду «струйной системы» добавочной полноты, что сказывается значительным усилением интенсивности воздействия штормовых волн на скуловых поверхностях в оконечностях корабля. Этот эффект хорошо виден в расчётах с простыми эллипсоидальными обводами корпуса (Рис. 56, Таблица 1), где в расчетах двукратный рост волнообразования на фазовых скоростях излучения расходящихся корабельных волн, и в опытовых испытаниях на воде (Рис. 57) проявляется крутым и высоким гребнем расходящейся корабельной вол-

ны, и, как следствие, усиленной бортовой и килевой качкой на ходу на трохоиальном 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.

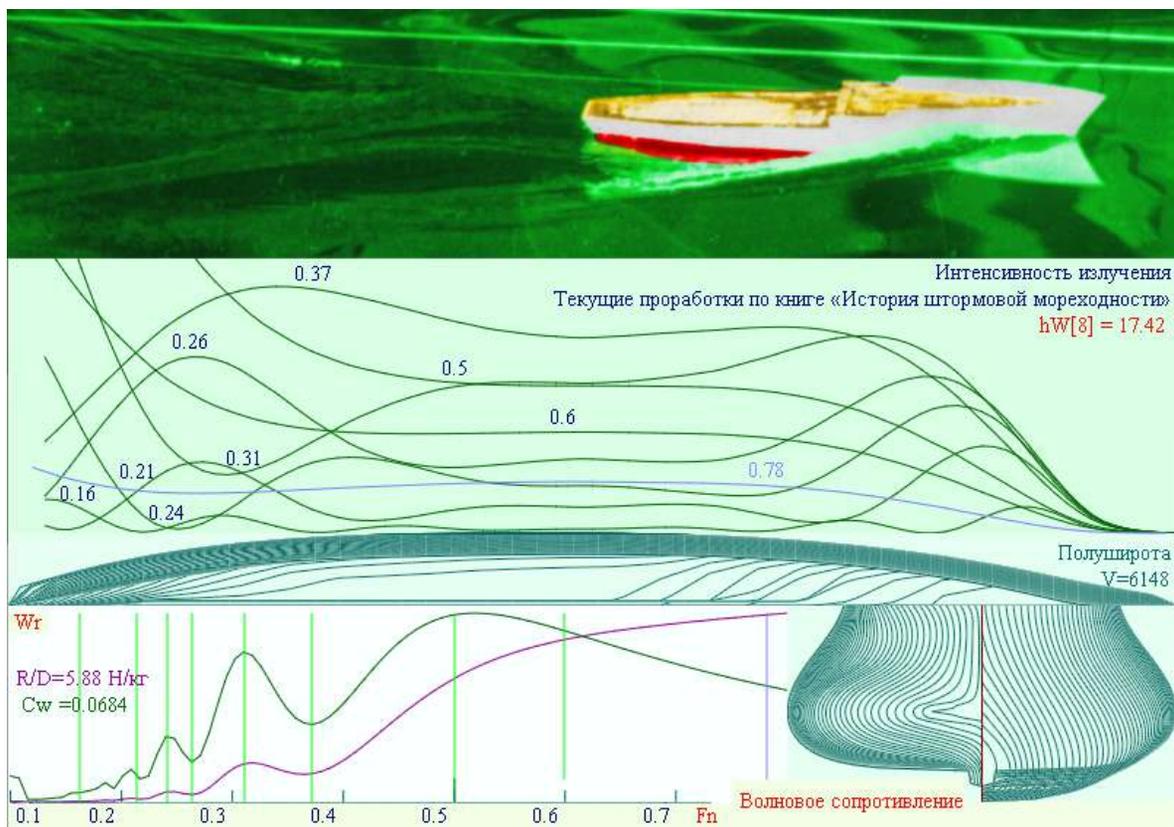


Рис. 57. Вычисление волнового сопротивления; интенсивности излучения и интерференции корабельных волн у корпуса опытовой модели из 1979-1980 гг. На верхнем фото показано зарождение и отрыв крупной расходящейся волны вблизи поверхности эквидистантных ватерлиний в носовой оконечности. Вследствие оголения горизонтального плавника на ахтерштевне, на большой скорости хода у модели проявляются проблемы с поперечной устойчивостью.

Самая первая малоразмерная опытовая модель корпуса проектировалась по штормовым наблюдениям на борту супертраулера «Багратио-

новск». Обводы такой модели концептуально согласовывались с наблюдениями за плаванием рыб на малой глубине под взволнованной ветром поверхностью Атлантического океана. Впоследствии проводились показательные и весьма успешные испытания в малом опытовом бассейне в Калининградском мореходном училище.

Последующая доработка обводов (Рис. 57) выполнялась в Севастопольском экспериментальном конструкторском бюро на борту научного судна СРТМК⁴³ «Зайнулла Мустакимов» в Чёрном море.

Непосредственно перед постановкой полноценных сравнительных мореходных экспериментов со специально оснащёнными крупными моделями судов, в обоснование проектирования и постройки гипотетической модели повышенной штормовой мореходности, проведены дополнительные оценочные эксперименты с двумя малыми моделями традиционных и условно рыбоподобных обводов (Рис. 57), но уже в гравитационной системе опытового бассейна кафедры теории корабля Ленинградского кораблестроительного института.

В те годы ещё не акцентировалось внимание на особенностях английской клиперской скулы с V-образными (треугольными) шпангоутами в оконечностях; вычислительные эксперименты ещё не были доступны для выявления невероятного улучшения мореходных качеств клиперских оконечностей корпуса, и потому в обводах не отрицался малый прирост полноты корпуса в «системе струйных образований» с эквидистантными ватерлиниями и резким загибом батоксов для вертикальных компонент набегающих на корпус потоков воды. К тому же, в планах мореходных испытаний на волнении предусматривалось рассмотрение особенностей формы и мореходных качеств корпуса при существенных изменениях по-

⁴³ СРТМК – средний рыболовный траулер кормового траления.

садки, как отличие штормовой гидромеханики для кораблей с различными отношения ширины к осадке корпуса.

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

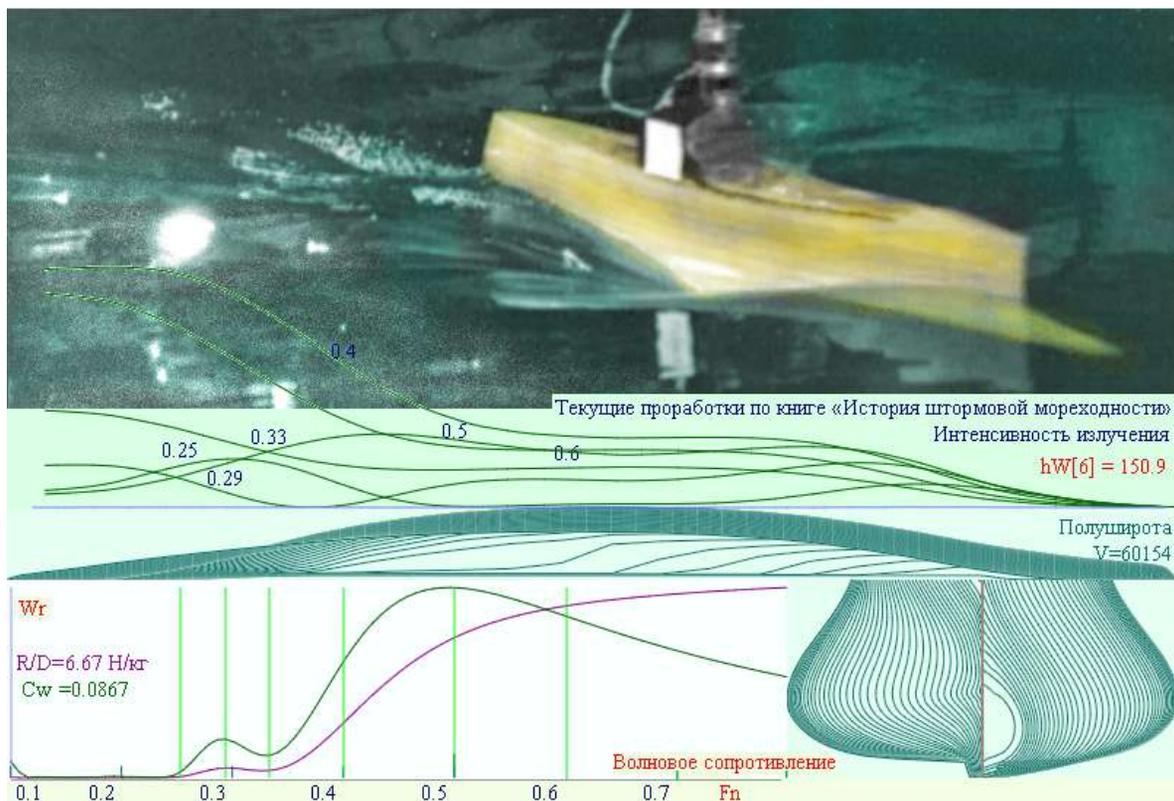


Рис. 58. Обводы носовой скулы модели МИДВ-85 лишь отчасти учитывают необходимость плавного затягивания встречного набегающего под днище корпуса, отчего в расчетах проявляется экстремум на кривой волнового сопротивления на скорости $F_n = 0,3$. В эксперименте, верхнее фото, модель показывает образование крутой расходящейся корабельной волны, которая в противофазе вместо отрыва от борта начинает оголять днище корпуса за пределами носовой скулы.

В результате расчётов волнового сопротивления получается, что для судна с эквидистантными скуловыми ватерлиниями (Рис. 57) характерно

интенсивное волнообразование с крупными обрушающимися гребнями расходящихся корабельных волн на скоростях хода порядка $Fn \approx 0.3$, что не мешает вполне оптимистичным оценкам коэффициента волнового сопротивления на больших скоростях хода $Fn \geq 0.5$, обусловливаемым весьма заметным завалом борта на уровне действующей ватерлинии.

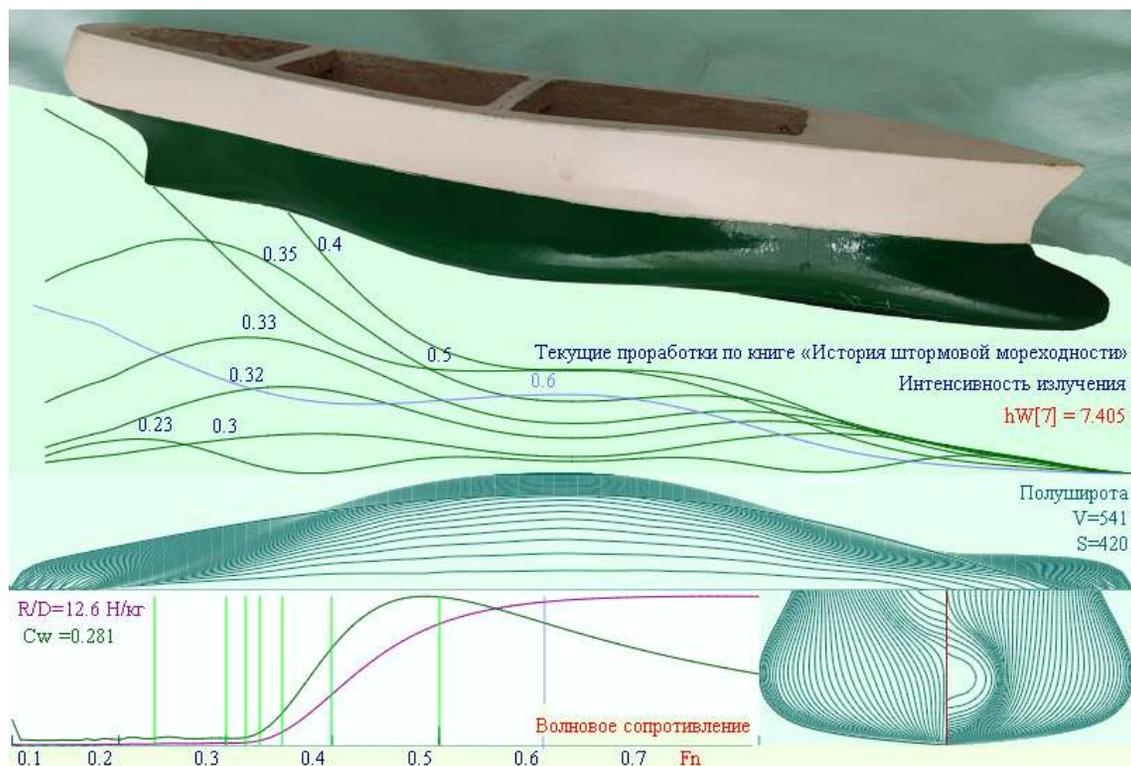


Рис. 59. *Оценки интенсивности корабельного волнообразования и волнового сопротивления для обновлённых в 1987 году обводов корпуса со скуловыми сужениями носовых и кормовых ветвей шпангоутов для плавного сопряжения набегающих потоков между бортовыми и днищевыми поверхностями.*

В экспериментах в опытовом бассейне Ленинградского кораблестроительного института (Рис. 58) 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.

В другом примере (Рис. 59), со специально разработанной моделью по результатам большой серии мореходных испытаний в опытовом бассейне кафедры теории корабля Ленинградского кораблестроительного института, складывается благоприятная интерференция корабельных волн, что наглядно представляется на кривой волнового сопротивления вплоть до скоростей хода $Fn \approx 0.35$. 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 опытовой моделью не фиксировалось крупных расходящихся волн, при видимом эффекте «затягивания» излучаемого гребня новой корабельной волны под днище корпуса. В штормовых испытаниях наблюдалась трансформация килевой качки в преимущественно вертикальную, что удовлетворяет лучшей штормовой ходкости и управляемости.

Мореходные испытания этой модели на чистой воде 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 взаимокompенсация 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.

Сравнительные испытания гиперболизованной модели МИДВ-85 в сопоставлении с быстроходным судном 60-серии ($\delta = 0,572$) подтверждали значительно лучшие ходовые и мореходные качества (Рис. 67) на всех скоростях штормового хода на умеренном и крупном волнении. Таким образом, подтверждается справедливость концепции эволюционного развития представлений о наилучшей форме корпуса корабля, и последующие проекты пяти кораблей и судов повышенной штормовой мореходности, построенные и оптимизированные с перспективой практической эксплуатации в реальной морской практике, в экспериментах на волнении в опытовом бассейне Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Рис. 69) также показывали превосходные мореходные качества в сравнении с моделями МИДВ-85 и 60-серии.

«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 устройением «системы струйного обтекания⁴⁴» 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.

⁴⁴ *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».*

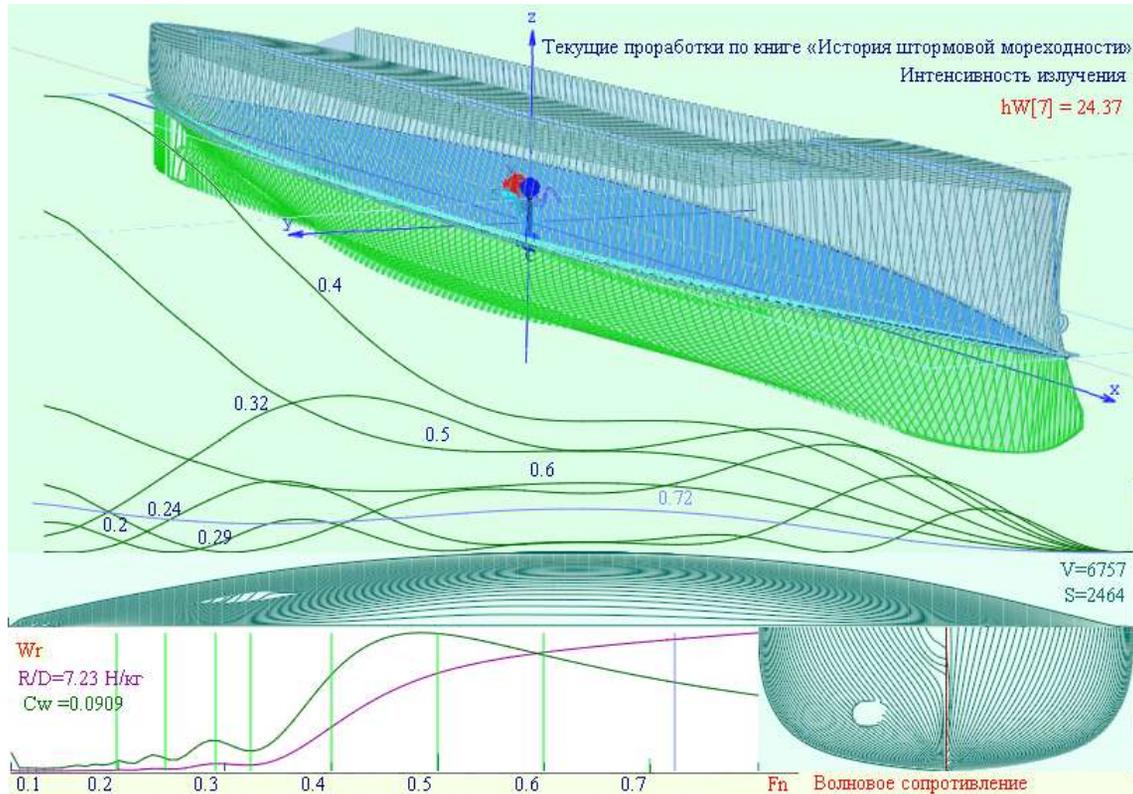


Рис. 60. Результаты расчётов интенсивности корабельного волнообразования и волнового сопротивления для крейсера I-ранга «Аврора».

Такое увеличение полноты допустимо для малых кораблей, типа миноносца «Касатка», с расчётной скоростью хода по Фруду более чем $F_n > 0,5$, когда интенсивность корабельного волнообразования более всего зависит от формы мидельшпангоута. Однако, в движении на относительно коротких ветровых волнах, с 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.

Обводы корпуса крейсера «Аврора» справедливо оценивать практически идеальными в плане всепогодной мореходности, и в целом по штормовой ходкости (Рис. 60) и плавности качки (Рис. 49), что выше уже обосновывалось при анализе устойчивости, гидростатики и гидромеханики силового воздействия на корпус корабля гребней девярых валов и прогрессивных штормовых волн и зыби.

В обводах крейсера «Аврора» упоминаемое здесь негативное искажение скуловых обводов очень слабое, тем не менее, расчеты корабельного волнообразования и волнового сопротивления выявляют вполне заметное проявление экстремумов по высоте и крутизне расходящейся корабельной волны (Рис. 60), и как следствие, прогнозируется несколько большая интенсивность силового воздействия штормовых волн с соизмеримыми характеристиками по фазовой скорости $Fn \approx 0,33$, набегающих извне на корпус корабля.

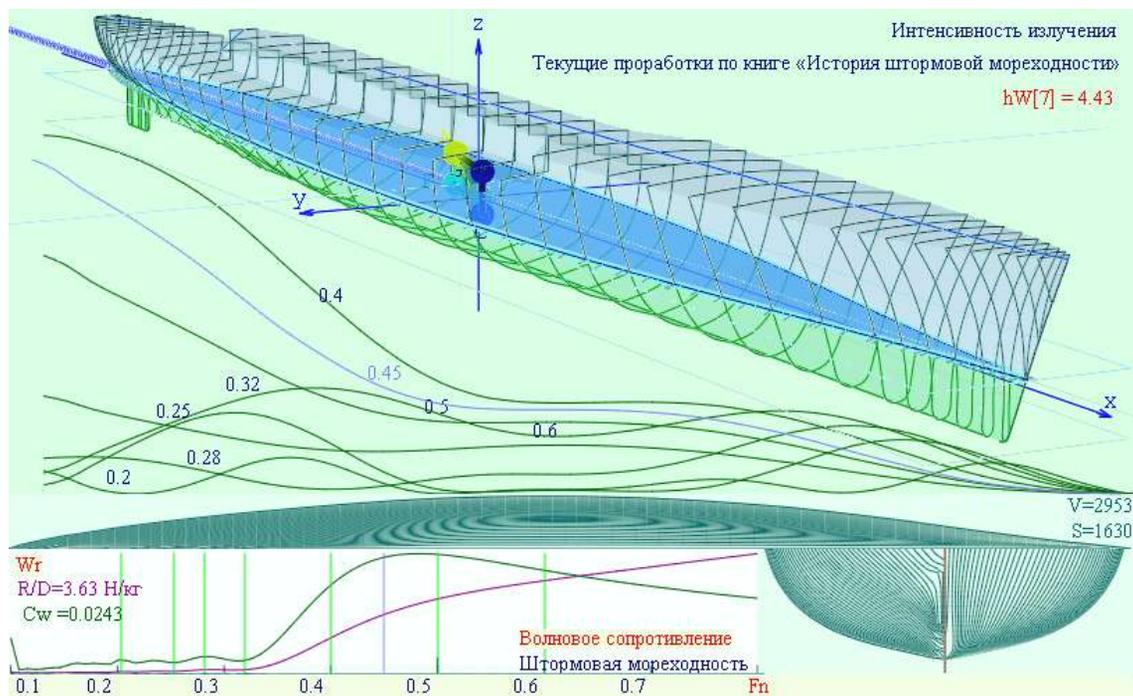


Рис. 61. Лидер эсминцев «Ташкент» итальянской постройки – своеобразный образец формирования V-образных клиперских скуловых обводов как в носовой, так и в кормовой оконечностях корабля.

Совершенными в рассматриваемом контексте являются обводы иностранного корабля – итальянского проекта быстроходного корабля с проектной скоростью хода до 44,5 узлов. Это легендарный лидер эсминцев «Ташкент», заложенный в 1935 году на верфи в Ливорно по проекту судостроительной компании «Одеро-Терни-Орландо» (*Odero-Terni-Orlando Società per la Costruzione di Navi*).

Лидер «Ташкент» отличался особой ходкостью (Рис. 61), достигая на длинных переходах более $V = 41$ узлов скорости, что по Фрудру составляет $Fn = 0,58$, с образованием поперечной корабельной волны в 2,1 раза длиннее корпуса корабля. Обводы лидера великолепно отработаны, и совсем легкое бульбовое образование в носу способствует снижению ходового дифферента на корму на скорости $V > 40$ более узлов до остаточных $\psi \approx 0^\circ 2'$ двух угловых минут.

Клиперские V-образные обводы по носовой скуле приводят к плавному закручиванию встречного потока под днище ближе к средней части корпуса. Ветви кормовых шпангоутов лидера «Ташкент» также обретают треугольную форму в сторону кормового подзора. Обводы корабля удовлетворяют требованию значительного уменьшения волнообразующей длины корпуса. На ходу встречный поток плавно затягивается под днище корабля, что способствует гашению расходящейся корабельной волны (Рис. 61), и в соответствии с принципом взаимности излучения и отражения в гидромеханике волновых процессов обеспечивается стабилизации килевой качки, как это оговаривается в изобретении⁴⁵ «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.

⁴⁵ «Корабль без килевой качки на ходу на волнении». Храмушин В. Н. Роспатент. Рег. № 2007133625 от 2007.09.07, вх. № 036722. Бюл. № 8 от 2009.03.20.

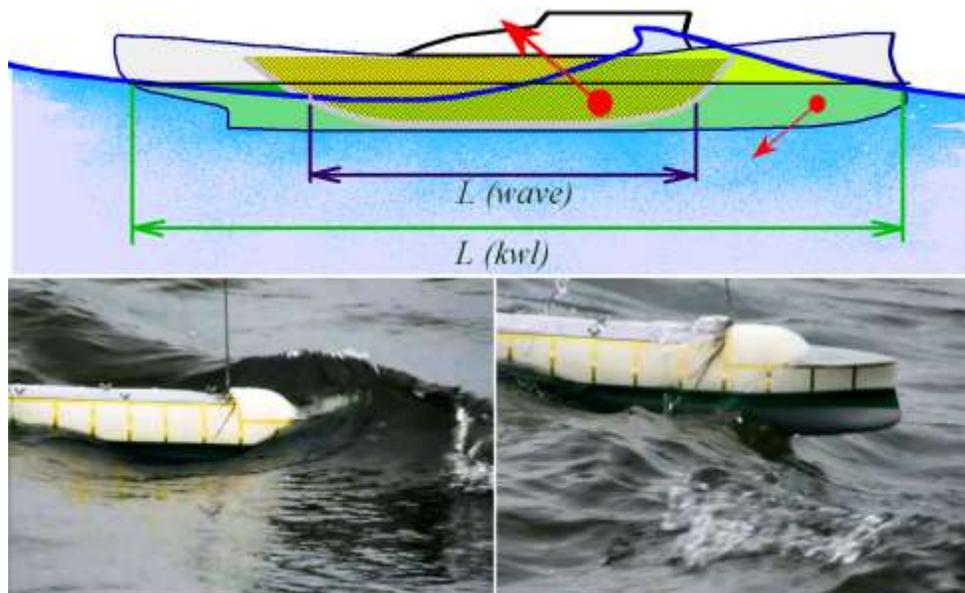


Рис. 62. Гидромеханика килевой качки интерпретируется с использованием исторического понятия волнообразующей – волнопринимающей длины корпуса $L(\text{wave})$, за пределами которой на $L(\text{kwl})$ корпус подпадает под прямые удары прогрессивных трохоидальных волн, где скуловые обводы и относительно низкий надводный борт должны способствовать стабилизации качки

Экспериментальная проверка концептуального решения (Рис. 62, два фото внизу) превзошла прогнозы частичного ослабления килевой качки. Визуально корпус удерживался строго горизонтально⁴⁶, килевая качка не наблюдалось вовсе, 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 взаимокompенсацией от меньшей силы с большим плечом от миделя $L(\text{kwl})$, возникающей вследствие разрежения у скуловых обводов

⁴⁶ 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.

со специально закрученной и широкой поверхностью над заострёнными V-образными скуловыми шпангоутами за форштевнем. Отметим, что использование бульба лишь способствует увеличению угла закручивания потока для создания большего разрежения в зоне образования гребня носовой расходящейся корабельной волны.

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

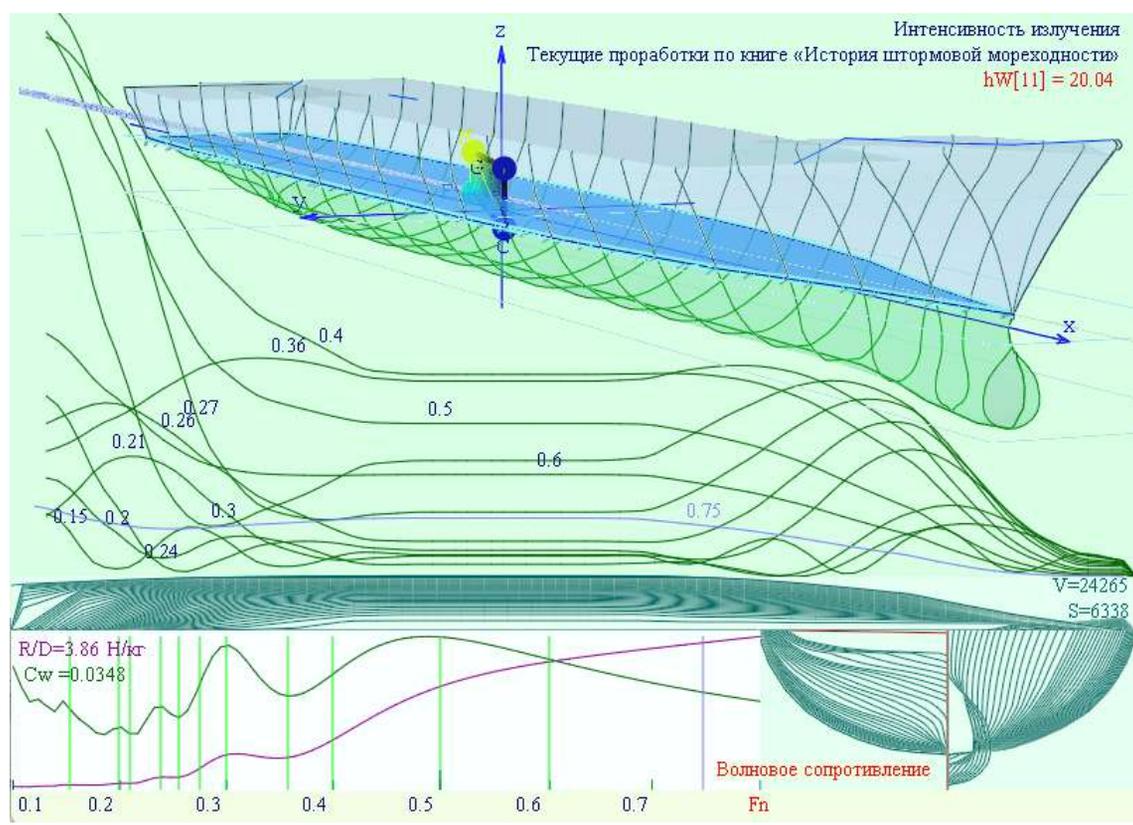


Рис. 63. Крейсер «Киров» с эквидистантными ватерлиниями «струйной системы обтекания» по носовой скуле.

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

сильной килевой качкой удлинённого тела под гидростатическим воздействием трохойдальных 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. 63), создающими чрезмерные пульсации внешних сил под воздействием штормовых волн. Другой корабль для сопоставления ходкости будет вполне современным, с удивительно похожими на «Ташкентские» обводы в средней части корпуса, и это крейсер «Киров» из эпохи 80-годов СССР.

Атомный крейсер «Киров»⁴⁷ 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. 61) пик сопротивления на 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].

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

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

⁴⁷ Цифровая модель «Кирова» лишь похожа на обводы настоящего корабля, но всё же, обобщённые выводы по искаженному корпусу не утрачивают актуальности

В зоне скуловых обводов крейсера, за бульбовым форштевнем всё могло бы быть существенно лучше. Хорошо отлаженный бульб должен в помощь клиперским обводам и без нарушения плавности усиливать закручивание потока под днище корпуса корабля, как это устроено у лидера «Ташкент» (Рис. 61). Замена V-образных шпангоутов эквидистантными ватерлиниями с полными U-контурными из «системы струйного обтекания» приводит лишь к кратному увеличению интенсивности пакета расходящихся корабельных волн, и как следствие к значительному усилению штормового воздействия на корпус корабля (что может быть признано проектным просчётом).

Вопросы ослабления килевой качки могут рассматриваться в качестве обратной математической задачи корабельного волнообразования на всех, включая закритически высоких скоростях хода корабля [Поисковые..., 2004]. Выравнивание со снижением уровня кривой волнового сопротивления для корабельных волн, соизмеримых по длине со штормовыми волнами, в рамках интерпретации интегралов Мичелла соответствует прохождению волн через корпус корабля с минимальными искажениями, то есть – с минимальными импульсами силовых реакций на отражение корпусом таких гребней штормовых волн.

В целом, к абсолютным величинам в приведенных вычислениях должно относиться настороженно, так как при аппроксимации сингулярностей в интегралах пока не получается определиться с точными пределами или эмпирическими постоянными интегрирования. В то же время, недоопределённые параметры численной аппроксимации в едином расчётном алгоритме не оказывают существенного влияния на результаты внутри малых интервалов интегрирования. Собственно форма кривых волнового сопротивления и соотношения величин волнового сопротивления для разных скоростей хода конкретного корабля, могут считаться вполне приемлемыми решениями сложной задачи гидромеханики для

проектного оценивания и практического использования в кораблестроительной практике.

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

Первые полноценные и комплексные испытания гипотетической модели МИДВ-85 проводились в 1985 году под руководством и при участии профессора кафедры теории корабля Александра Николаевича Холодилина. В проект опытовой модели (Рис. 50 и Рис. 58) закладывалось экстраполяционное усиление эволюционной трансформации обводов и общекорабельной архитектуры исторических кораблей и судов конца XIX – начала XX веков, проектировавшихся при непосредственном участии мореплавателей. Для адекватного сопоставления экспериментов со стандартными и общепризнанными историческими сериями модельных испытаний, в серию опытов в том же измерительном окружении включались учебная модель быстроходного судна 60-серии с коэффициентом общей полноты $\delta = 0,572$; и эталонная модель судна «Victory» с несколько большей полнотой корпуса: $\delta = 0,675$, но отвечающих эстетически безупречным проектным воззрениям корабельных инженеров второй половины XX века.

Гидродинамической особенностью и достоинством мореходных экспериментов в Ленинградском кораблестроительном институте представляется уникальная гравитационная система опытового бассейна кафедры теории корабля, обеспечившая заданную тягу, аналогично штормовому ходу с работающими маршевыми двигателями. При этом модели судов оснащались гироскопическими регистраторами углов крена и дифферента, а электронная следящая система синхронизировала движение тележки строго над моделью для поддержания жгута кабелей измерительной теле-

метрии, и попутно регистрировались мгновенные значения скорости хода, а для фиксации времени и осредненной скорости на «мерном отрезке» срабатывали датчики времени от светодиодов. Для выделения из полного сопротивления движению моделей волновой составляющей, связанной с интенсивностью продольного и поперечного корабельного волнообразования, задействовались струнные волнографы.

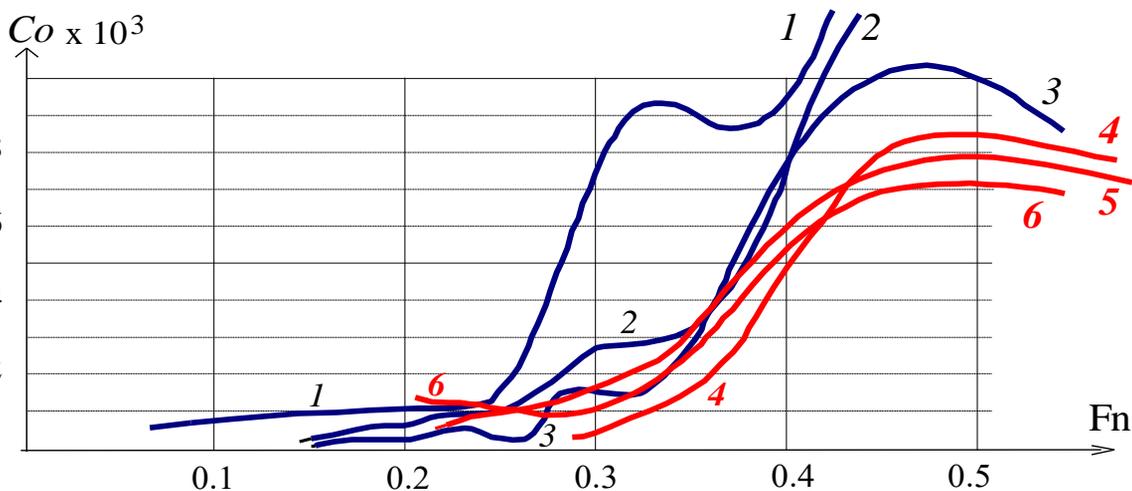


Рис. 64. Сравнительные кривые коэффициентов остаточного сопротивления моделей. 1. Эталонная модель «Victory»; 2. Модель 60-й серии; 3. МИДВ, осадка: $T=135$ мм; 4. $T=125$ мм; 5. $\Delta T=40$ мм на корму; 6. - ход кормой вперед; 1÷3 – испытание в гравитационной системе; 4÷6 – под буксировочной тележкой.

На исходном этапе проводились испытания модели МИДВ-85 на тихой воде с целью определения наилучшей по удельному сопротивлению посадки корпуса, в максимально широком диапазоне изменения осадок и дифферентов, охватывающими как бы своеобразную серию с различающимся завалом/развалом и характером кривизны шпангоутов на уровне действующей ватерлинии (Рис. 64 – кривые 3÷6), отчего в проекте обводов модели МИДВ предусматривалось построение теоретических ватерлиний в оконечностях равноудалённо одна от другой, что впоследствии сказалось усилением корабельного волнообразования вблизи скуловых обводов в оконечностях корпуса.

При выделении остаточного сопротивления (волнового и формы) модели использовался стандартный коэффициент ИТТС⁴⁸-57 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 возвратного хода под ударами гребней встречных волн, что единственно соответствует реальной ходкости корабля в штормовых условиях плавания.

По графикам (Рис. 64) подтверждаются результаты численных расчётов волнового сопротивления, прогнозировавших улучшение ходкости на больших скоростях хода при $Fn \geq 0,5$, которое достигается за счет завала бортов и уменьшения ширины действующей ватерлинии в средней части корпуса.

На осциллограммах волнографа также подтверждалось, что максимальная высота корабельной волны проявляется на скорости хода $Fn \approx 0,5$, при дальнейшем разгоне высота волны заметно снижается, что объясняется стабилизацией динамической посадки корпуса за счёт завала

⁴⁸ — 8th International Towing Tank Conference, Madrid, Spanish, September 1957,
 $C_F = 0,070 \cdot (\log_{10} Rn - 2,12)^{-2}$

бортов в районе действующей ватерлинии (вместо привычного ходового дифферента проявляется взаимокомпенсация локального волнообразования, в том числе с проявлением эффекта «антиглиссирования»).

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

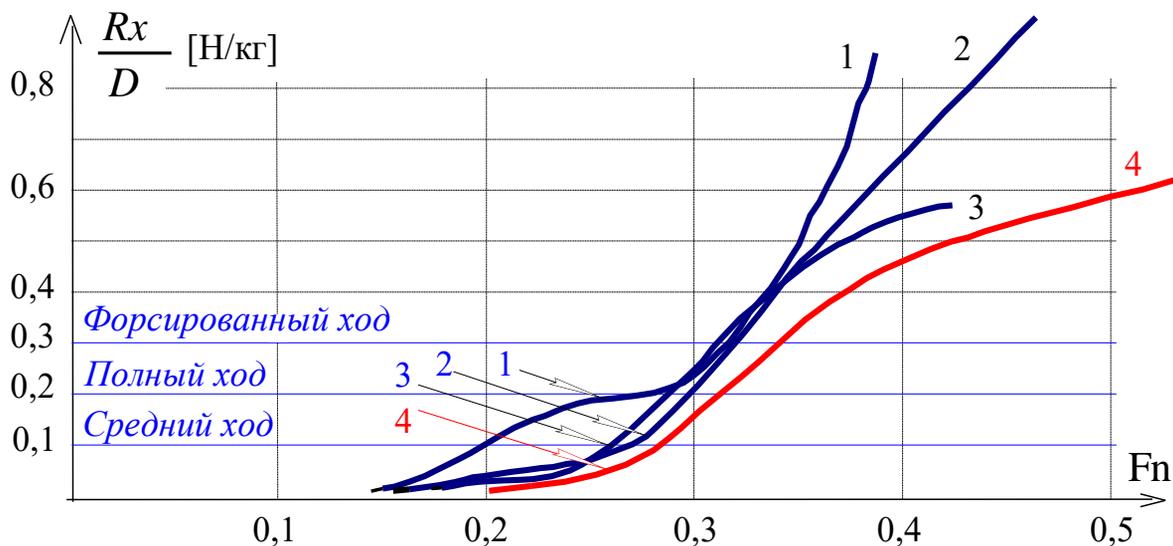


Рис. 65. Удельное остаточное сопротивление моделей. 1. «Victory»; 2. 60-й серии; 3. МИДВ, $T = 135$ мм; 4. МИДВ при оптимизированной посадке: $T=125$ мм; $\Delta T=20$ мм на корму. 1÷3 - испытание в гравитационной системе; 4 - на буксировочной тележке.

В вычислительных экспериментах подтверждается, что экстремумы удельного по водоизмещению волнового сопротивления приводятся к одинаковым отсчётам относительных скоростей хода по числам Фруда, а форма и величины зависят формы и размерений корпуса.

Все три опытовые модели имели схожие соотношения размерностей корпуса, и поэтому по ходкости на тихой воде были выбраны три режима гравитационной тяги (Рис. 65), 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* $Rx/D = 0,3$ [Н/кг] – соответствует форсированному ходу военных кораблей или предельной ходкости быстроходных транспортных судов (*верхний рисунок*)
2. *Полный ход* $Rx/D = 0,2$ [Н/кг]. Главные двигатели работают в расчётном режиме, соответствующем экономичному ходу (*средний рисунок*);
3. *Средний ход* $Rx/D = 0,1$ [Н/кг]. Режим безопасного хода на крупном волнении или штормования (*нижний рисунок*).

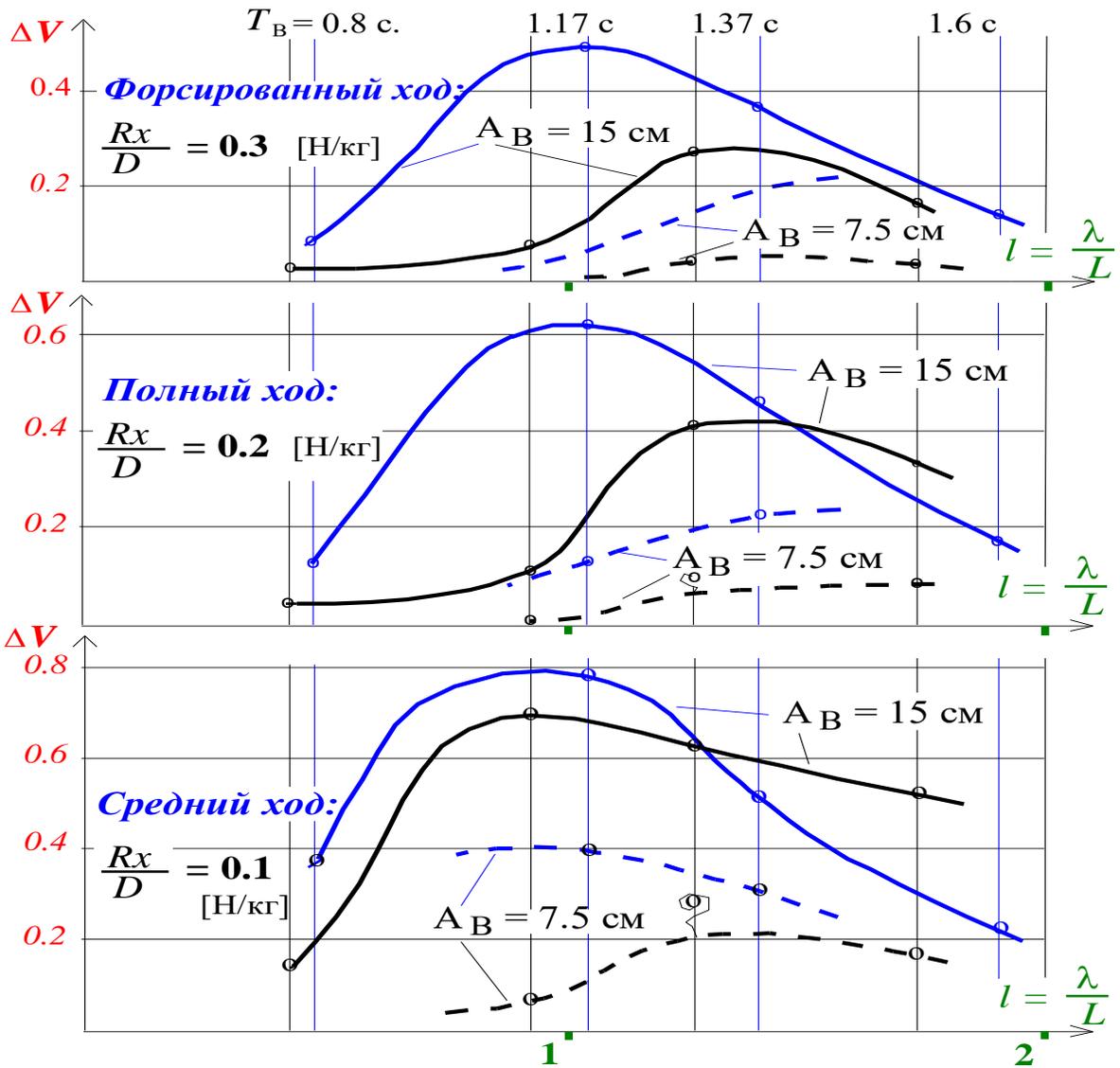


Рис. 66. Сравнение величин потери хода на волнении модели с корпусом МИДВ (черные кривые) и модели быстроходного судна 60-й серии с $\delta=0.572$ (синие кривые).

Сравнительные результаты испытаний по ходкости на волнении представляются в виде графиков потери хода моделей МИДВ и быстрого судна 60-й серии (Рис. 66). Аргументом выбрана относительная длина волны, соразмеренная с длиной корпуса испытываемой модели $l = \lambda / L$, где длина волны λ вычисляется по периоду времени одного такта волнопродуктора: $\lambda = g \cdot T^2 / 2\pi$, что следует из дисперсионного соотношения для волн на глубокой воде: $\omega^2 = g \cdot k$, $\omega = 2 \cdot \pi / T$, $k = 2 \cdot \pi / \lambda$.

Величины потери хода на волнении сняты с буксировочных кривых и соотнесены со скоростью моделей на тихой воде: $\Delta V = (Fn_o - Fn_b) / Fn_o$, где L – расчетная длина корпуса испытываемой модели; Fn_o – скорость по Фрудру на тихой воде; Fn_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.

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 регулярными проявлениями невесомости, на

борту широкопалубных судов (Рис. 67, кривая $\bar{\theta}$ справа) означают возникновение опасности отрыва грузов от палубы, и в таком случае могут расцениваться исключительно с позиций неминуемости морских катастроф.

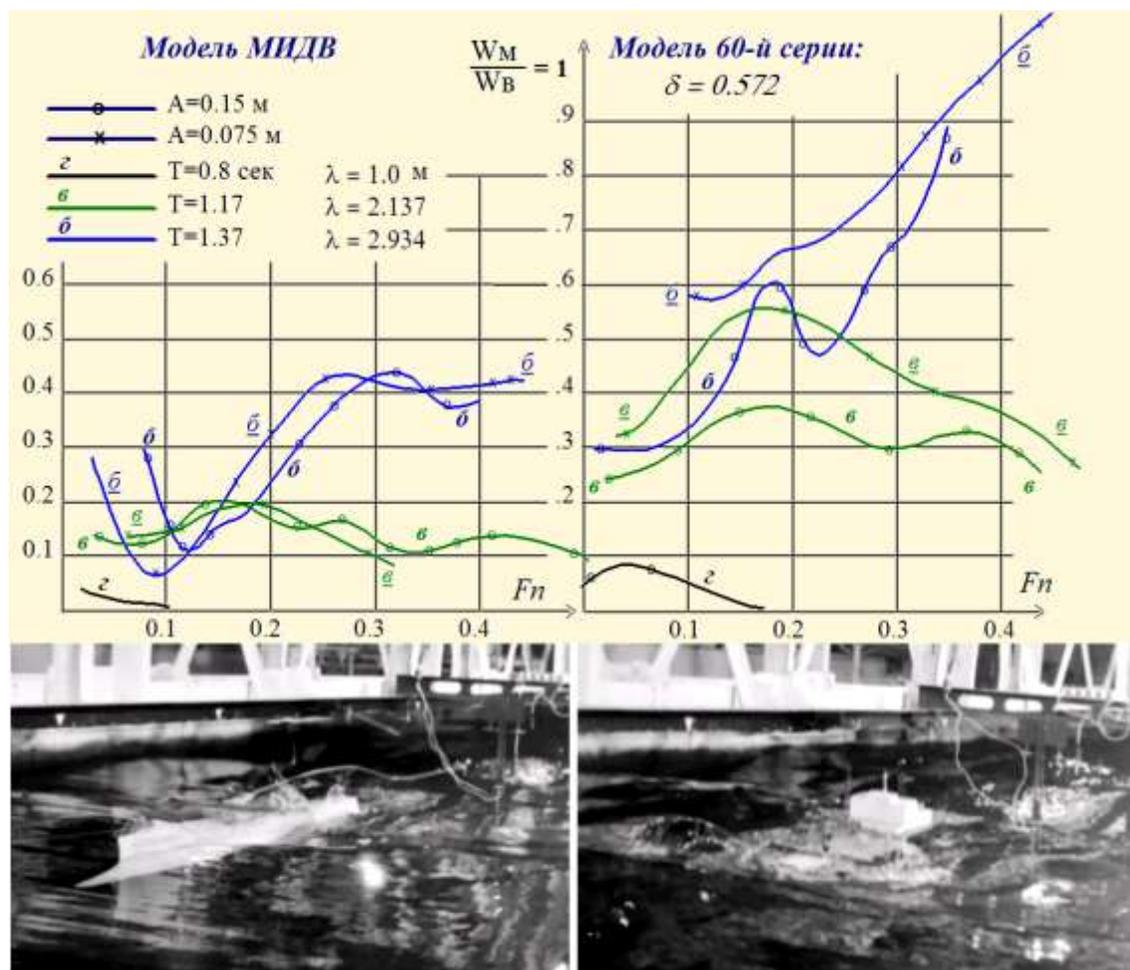


Рис. 67. Интенсивность килевой качки в зависимости от скорости хода в условиях встречного регулярного волнения с нормировкой на вертикальные ускорения частиц жидкости в гребне волны. По вертикали относительные ускорения в оконечностях моделей. Левый рисунок – модель МИДВ, правый – стандартная модель судна 60-й серии

К тому же, приведенное на графиках (Рис. 66) преимущество в ходкости может проявляться только в сравнении с результатами испытаний гиперболизированных обводов конкретной модели МИДВ, которая строилась для проведения опытовых испытаний в широком диапазоне пере-

менных 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. 67 представлены величины ускорений в оконечностях корпуса, обезразмеренные по величине $W_B = \omega^2 \cdot A = 4\pi^2 \cdot A/T$ – относительно ускорений частиц жидкости на свободной поверхности в гребне прогрессивной штормовой волны. В случае обрушающегося гребня, ускорение в гребне волны достигает g – ускорения свободного падения.

В построении рисунков учтен осредненный (среднестабильный) размах килевой качки, с экстремальными всплесками в записях бортового гироскопа 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*).

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

***Всепогодный океанский флот Главного управления
кораблестроения России 2001 года***

В развитие и обоснование проектных изысканий, в 2004 году по гранту нефтепромышленной компании «Сахалинская энергия» строилось

пять самоходных телеуправляемых моделей кораблей и судов повышенной штормовой мореходности. Четыре модели были представлены к мореходным испытаниям в опытовом бассейне Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, из них три модели: корвет, буксир и транспортное судно – успешно прошли запланированный цикл экспериментов без существенных замечаний

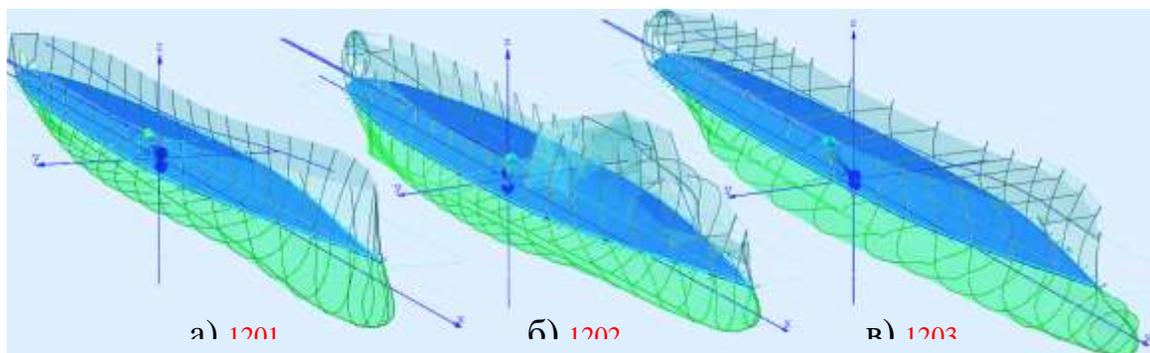


Рис. 68. *Прорисовки цифровых моделей трёх (из пяти) проектов кораблей и судов, разработанных в интересах Главного управления кораблестроения России в 2001 году, и прошедших мореходные испытания в опытовом бассейне Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Условные названия моделей: а) корвет-1021; б) буксир-1202; в) транспортное судно-1203(Univer-86).*

Свободное движение новых опытовых моделей проводилось под дистанционным управлением рулями и маршевыми электродвигателями. Опорные оценки ходкости предварительно определялись в испытаниях на тихой воде, которые затем использовались в предустановках мощности двигателей в экспериментах на интенсивном встречном и попутном троицидальном волнении.

Задействовались два режима мощности двигателей для полного и среднего хода, с условно половинной тягой. Однако, в условиях интенсивного волнения ходкость в большей степени зависела от стабильности работы гребных винтов. Так, по четвертой модели, модели траулера с плохо отработанными обводами кормового подзора, штормовые испыта-

ния признаны некорректными, ввиду частого оголения гребного винта на умеренной по интенсивности килевой и вертикальной качке.

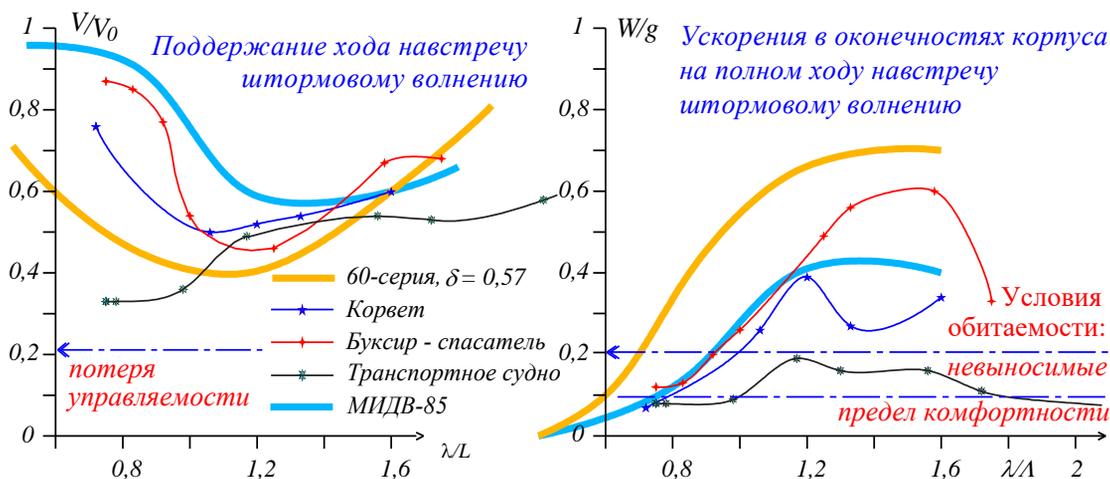


Рис. 69. Обобщенные результаты опытовых испытаний ходкости (слева) и килевой качки (справа) моделей судов, оптимизированных для штормового плавания. Как и ожидалось, ходовые качества моделей перспективных судов оказались несколько лучшими, чем у традиционного быстроходного судна 60-серии, но худшими в сравнении с гипотетическим судном МИДВ-85. В то же время все проекты новых судов подтвердили превосходные результаты по условиям обитаемости в штормовых условиях.

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

На графиках ходкости и качки (Рис. 69, слева) специальными значками отмечены все результаты телеизмерений, которые при сопоставлении с оценками наблюдений по видеозаписям признаны вполне достоверными.

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

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

– Модель судна 60-серии на предельно малом ходу навстречу волне высотой в половину осадки и длиной равной длине корпуса ушла с курса и вырвала коромысло тросового ромба гравитационной упряжки. *Корпус нуждается в штормовом подрезе форштевня для возможности свободного рыскания на волне, а также в уменьшении надводного объема бака для исключения интенсивной килевой качки;*

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

– Оптимизированные для штормового плавания модели судов показывают значительное уменьшение килевой качки на полных ходах в усло-

виях интенсивного волнения. Судоводителям следует выбирать режимы штормового плавания на повышенных скоростях хода для снижения качки и повышения комфортности обитания на борту судна;

– Все испытанные самоходные модели судов теряют управляемость на малых ходах при движении по крупной волне, и обретают опасную способность к захвату корпуса волной и стремительной циркуляции (броучингу). 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. 69, справа), согласованное в действии с пассивным механизмом аварийного поддержания штормового хода и управляемости после остановки главных машин. Возможность полезного использования такого крыльевого устройства в штатном и аварийном режимах плавания служит показательным примером непротиворечивого проектирования сложной морской техники.

ПОСТАНОВКА И ПРОВЕДЕНИЕ ПРЯМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С КОРАБЛЁМ В ШТОРМОВОМ МОРЕ

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

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

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

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

Сопоставление результатов мореходных испытаний модели МИДВ-85 с хорошо изученной моделью 60-й серии, и эталонной моделью судна «Victory» выполнялось только в 1985 году в большой последовательности специальных экспериментов в опытовом бассейне Ленинградского кораблестроительного института. В экспериментах тех лет складывалось общее впечатление, что чем круче и выше волна, вплоть до выплёскивания гребней через борта бассейна, тем естественнее штормовое плавание для гипотетического судна с малой инерцией действующей ватерлинии (МИДВ), и чем меньше его остойчивость – тем меньше размах качки. Бережное отношение к особо ценным стандартным моделям не предполагало экстремальных экспериментов с нарушениями безопасности и сохранности моделей и оснастки на крутой волне.

Но всё же, единичный аварийный случай прервал цикл испытаний с моделью 60-й серии на самых малых ходах на умеренном встречном волнении, когда скорость хода в гравитационной тяге пульсировала с откатами до заднего хода. Примерно на середине «мерной мили» модель остановилась, затем с громким треском выломано весьма прочное крепление тросовой упряжки, что произошло в результате некоего «параметрического резонанса» или «бровичинга» 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 боль-

шей тягой в гравитационной упряжке модель хода боле не теряла, и других аварийных ситуаций не создавалось.

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

В ходе морских экспериментов с моделями под ветром и по волне на открытой воде, к сожалению, существовала проблема интерактивных оценок состояния модели и текущих режимов дистанционного управления непосредственно в процессе опытовых экспериментов. К сожалению, в те времена (как и сейчас) имеется возможность использования только «спортивно-бытовой» аппаратуры, в которой искусственного разделяются цифровые радиоканалы для телеметрии и телеуправления, отчего в результатах получается некая бессистемность телеметрических измерений с плохо определёнными режимами телеуправления.

Идеальным было бы проведение всех экспериментальных работ под управлением единой компьютерной программе, как при назначении курса и скорости хода, так и при регистрации ответной динамики качки и ходкости без участия берегового оператора. Вкупе с недостаточной прозрачностью 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.

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. 70).

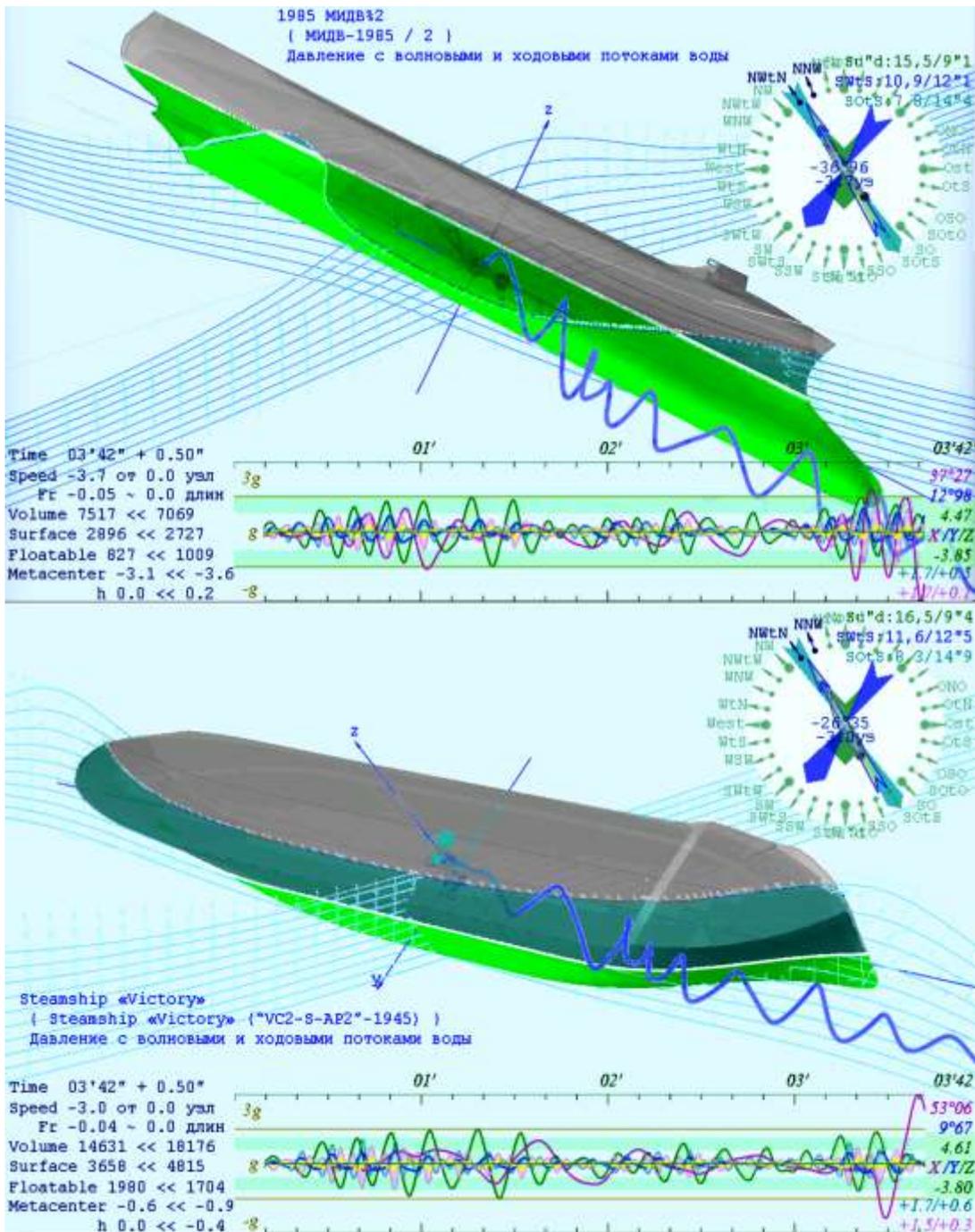


Рис. 70. Синхронные испытания МИДВ-85 и «Victory» без хода на трёх групповых структурах волн: $\lambda = \{ 1,0 \ 1,75 \ \text{и} \ 2,5 \} \cdot L$ – относительно длины корпуса, с высотами $h = \{ 1,0 \ 0,4 \ \text{и} \ 0,2 \}$ – от максимума трохоидального гребня, что составляет $\zeta = \{ 16,6 \ 11,6 \ \text{и} \ 8,3 \}$ м по высоте, соответственно. Курс навстречу первой системе волн зыби, свежая волна бьёт по правой 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.

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

Главным достоинством прямого вычислительного эксперимента представляется возможность контроля любой частицы жидкости в окружении корпуса корабля и каждого отдельного элемента судовой обшивки и взволнованной поверхности моря. В частности, на рисунках выше приводится информация по геометрии, кинематике и остойчивости судна; о воздействующем на него волнении с графиками углов качки и ускорений в оконечностях корпуса. В протоколах эксперимента фиксируется исходное состояние корабля и морского волнения, с последующими ежесекундными записями необходимых для оценок мореходности динамических параметров. Полный состав данных в файле текстового протокола «ShipName.vil» представлен в документации по вычислительному эксперименту в программном комплексе «Аутога». По необходимости этот протокол может перестраиваться и расширяться любой дополнительной информацией по штормовым мореходным качествам корабля.

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

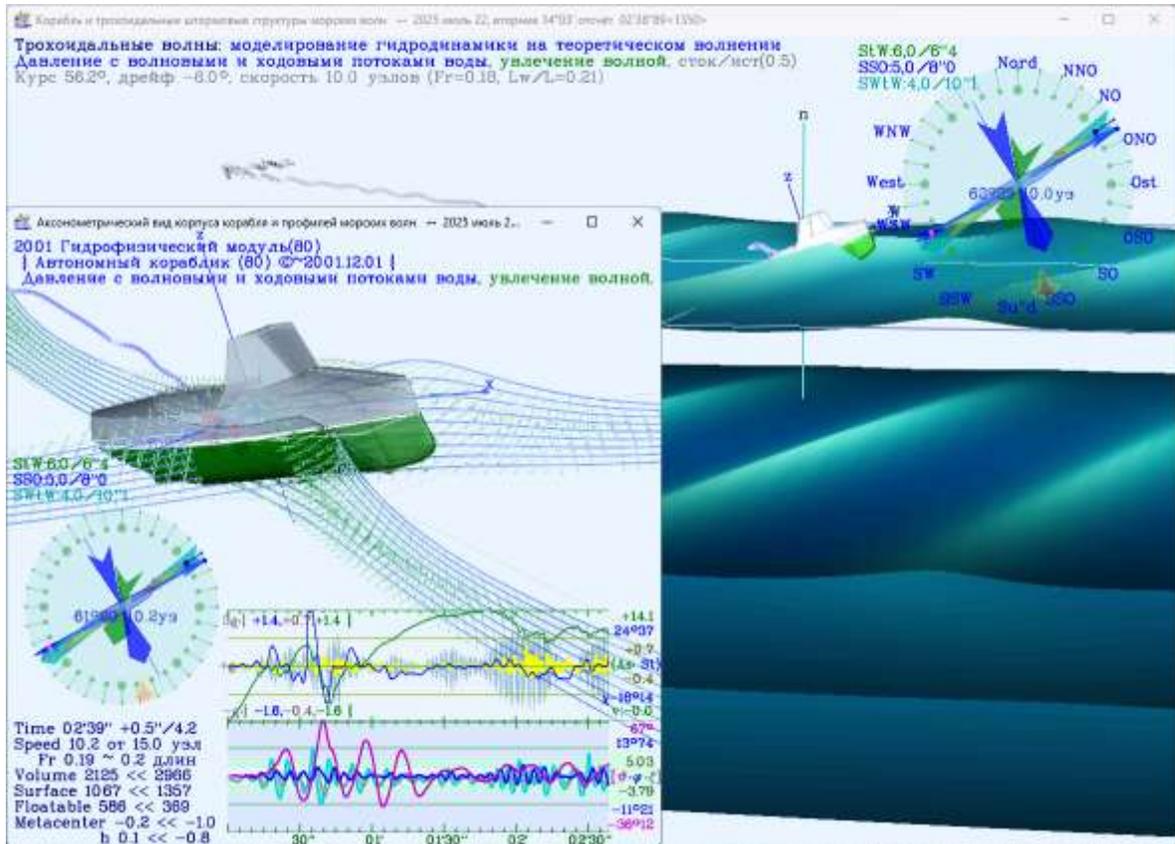


Рис. 71. В ходе вычислительного эксперимента задействуются два графических окна для представления морского волнения (справа) и корпуса корабля (слева) с метацентрическими отметками и графиками его динамики на ходу на волнении. На графиках ускорений в оконечностях, внизу слева, фиксируется небольшое отрицательное ускорение – невесомость. В целом в средней части корпуса ускорение порядка 0,3-g.

Управление курсом ведётся с помощью аналога бортового авторулевого, где заданное направление движения регулируется фиксированной скоростью циркуляции, что по аналогии с действием кормового руля может определяться как: «по малу право / лево»; «руль право / лево» и «право / лево на борт». Внешнее влияние волн может превышать управляющее воздействие «руля» с приведённой скоростью циркуляции, что снимает ограничения по возможности свободного рыскания на курсе в штормовом плавании, с плавным автоматическим приведением модели к заданному курсу, если последнее возможно в условиях заданного штормового волнения.

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

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

На графиках (Рис. 71) приводятся вертикальная качка (зеленый график с закраской), величины крена (фиолетовый) и дифферента (синий), а также вертикальные ускорения в средней части корпуса (желтая кривая) и в его оконечностях (голубая с закраской). Управление ходом корабля выполняется на любом из графических окон. На изображении с морским волнением осуществляется интерактивное перестроение групповых структур морского волнения и методов их моделирования. В окне с кораблем выполняются соответствующие настройки посадки, остойчивости, демпфирования корпуса и выбор модели гидромеханики силового взаимодействия корабля с морским волнением.

Особенности реализации штормовых опытовых и вычислительных экспериментов

Проведение вычислительного эксперимента в программном комплексе «Аурога» реализуется в интерактивной графической среде. Единообразие начальных условий задается с помощью файлов инициализации: *Aurora.vil (vessel-initiation+logging)* – для всей директории цифровых мо-

делей, и «Имя-модели».vii – для конкретной модели корабля. В процессе вычислительного эксперимента такой файл конфигурации будет дополняться протоколом с результатами моделирования мореходности и управляемого маневрирования корабля в условиях морского волнения.

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

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

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

Гидродинамическое качество обводов крейсера «Аврора» полагается безусловно высоким, и соответственно, оптимизированная геометрия должна приносить свойства заметного гидродинамического влияния да-

же на малые геометрические искажения или помехи на поверхности бортовой обшивки корабля, которые должны заметно сказываться на особенностях его штормовой мореходности. В морской практике минимизация силовых реакций на периодическое воздействие гребней штормовых волн, одновременно не исключает и не ограничивает усиленных реакций на воздействия иного рода, например кренящих моментов на циркуляции, ударов ледовых полей или давления ветра с неопределённой динамикой. Суть замечания в том, что стабилизация потоков близи корпуса корабля создает условия для эффективной работы управляющих устройств, рулей или успокоителей килевой и бортовой качки не особо большой громоздкости.

В случае неважно отработанных обводов, бортовые кили и крылья активных успокоителей качки могут крайне отрицательно влиять на мореходные качества корабля 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 по обводам и надводной форме корпуса.

Бортовые кили и крылья активных успокоителей качки

Интенсивность всех видов качки корабля в немалой степени зависит от возможности силового воздействия гребней штормовых волн на корпус корабля. Простейшим и крайне эффективным приспособлением и механизмом для такого раскачивания можно назвать бортовые кили и крылья активных бортовых «успокоителей» качки⁴⁹, подверженных прямому воз-

⁴⁹ В волнах малой высоты с синусоидальными профилями возможно высокочастотное демпфирование качки за счёт образования срывов поперечных потоков на бортовых

действию быстрых потоков воды в трохоидах под гребнями штормовых волн.

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.

Патентом «Корабль без бортовой качки на волнении» [№ 2360827 от 2007 года] показаны варианты сбалансированной гидромеханики бортовых килей (Рис. 52) 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.

килях, однако сопутствующие потери хода не менее значимы умерения слабой качки.

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. 52) показывается возможность оптимизации процессов гидромеханики на бортовых килях - успокоителях качки, поле которой возникает неоднозначность в оценках их эффективности в плане бортовой качки. В оценках влияния этих килей на ходкость, плавность рыскания на курсе, интенсивность килевой и вертикальной качки аксиоматика отрицательна, то есть в практическом плане возможно лишь 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).

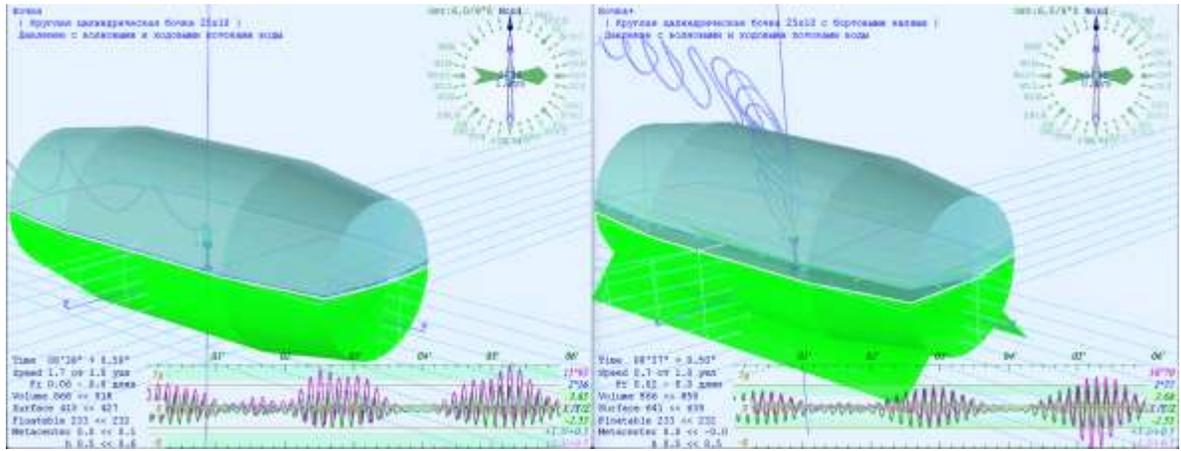


Рис. 72. Слева круглая цилиндрическая бочка на волне, справа она же, но с бортовыми наклонными килем. Длина волны $\lambda = 100$ м, высота $\zeta = 6$ м, ширина бочки $B = 10$ м, метацентрическая высота $h = 0,5$ м. Чистый корпус обретаеет размах качки до 16° . Тот же корпус с бортовыми килем усиливает размах крена при бортовой качке до 39° .

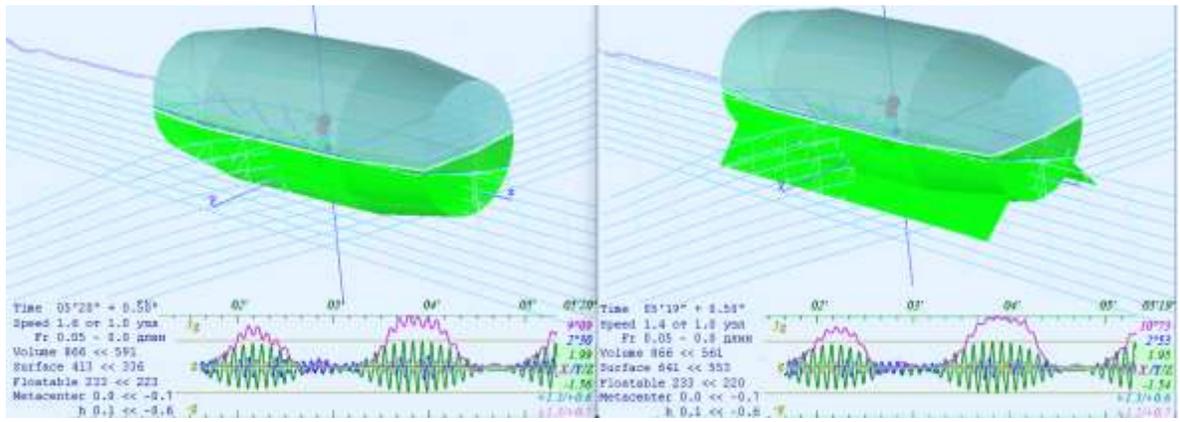


Рис. 73. Аналогичный синхронный эксперимент при длине волны $\lambda = 50$ м с высотой $\zeta = 3$ м, при этом метацентрическая высота уменьшена до 1% ширины, и составляет 10 см. Период качки теперь огибаеет пульсации штормовых волн. Усреднённый крен под действием вихревых потоков в гребнях волн у бочки с бортовым килем чуть больше, и в случае ветрового дрейфа величина такого крена будет возрастать.

Для сравнения вторая бочка будет обладать бортовыми плоскими килем 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 водоизмещаю-

щего корпуса. Плоскости килей устанавливаются под углом 45° симметрично по правому и левому бортам, и на всю длину испытываемой модели корпуса.

В вычислительном эксперименте, в программной среде «Аутога» не задействованы модели вязких течений жидкости, и, во избежание полной взаимокompенсаций давлений на бестелесных пластинах по парадоксу Даламбера, величина положительного отражающего импульса используется полностью, в то время как по обратной засасывающей стороне отрицательное давление по величине отчасти уменьшается, создавая качественно адекватный и строго фиксированный эффект от действия волновых сил⁵⁰. Интегральная величина сил от давления на притягивающей стороне (отрицательного давления) может отличаться от их естественного проявления на бортовых килях корабля, гидромеханика которых более определяется масштабами выступающих частей и скоростями в локальных потоках жидкости.

На рисунке выше синхронные вычислительные эксперименты с удлиненными бочками на трохoidalном волнении с длиной 100 метров и периодом 8 секунд, с половинной от максимума высотой гребней девятих 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.

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 относи-

⁵⁰ Здесь использован коэффициент $k_v = 0$ – обнуление отрицательного давления в потоке притяжения строго по нормали к элементарной расчетной площадке.

тельно килевой качки корпуса, которая должна следовать строго в такт волновых колебаний.

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

В вычислительном эксперименте (Рис. 73) корпус модели выведен из такта бортовой качки на волне путем уменьшения метацентрической высоты до 10 см, что составляет 1% ширины корпуса. Внешнее воздействие гребней девятых валов уменьшено пропорционально длине до 50 метров и высоте до 3 метров, с периодами вол до 5,7 секунд. Собственный период колебаний корпуса теперь достигает порядка 32 секунд.

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

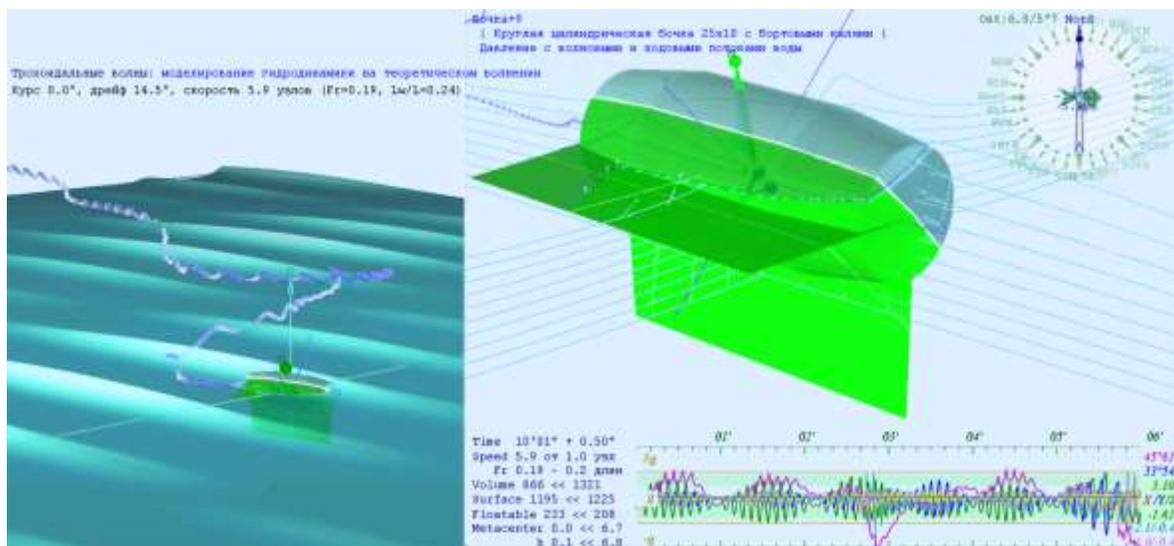


Рис. 74. Вариант опытов с бортовыми килями значительно большей площади.

В дополнительном эксперименте по экстремальной динамике плавания (Рис. 74) 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 теперь превышают 50° с дифферентом более 33° , что свидетельствует лишь о частых захватах корпуса гребнями волн, после которых модель сбивается с курса, испытывает брочинг, дельфинирует или получает сокрушительные гидродинамические удары по выбираемым из воды бортовым килям.

Бортовые кили завышенной площади почти вдвое увеличили ускорения вертикальной качки, но всё же следует отметить, что установка больших и сверх больших бортовых килей отчасти снижает размах вертикальной качки, в последнем случае с размахом до 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 не исключается 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.

Специальный вычислительный эксперимент 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.

Положительного эффекта от пера руля, днищевого и бортовых килей для крейсера «Аврора» не подтверждается (Рис. 75). Возможно, что при-

чиной не ярких отличий в результатах вычислительных экспериментов является гидродинамическая взаимокомпенсация внешних штормовых воздействий на безупречно отработанных обводах крейсера, что ранее приказывалось в схемах гидромеханики при обоснованиях из патента 2007 года № 2360827 «Корабль без бортовой качки на волнении».

Положительный эффект бортовых килей для крейсера «Аврора» возможно существует, но лишь в демпфировании слабых гармонических воздействий от совсем уж малых синусоидальных волновых колебаний, однако именно это пусть пока останется за границами настоящих исследований.

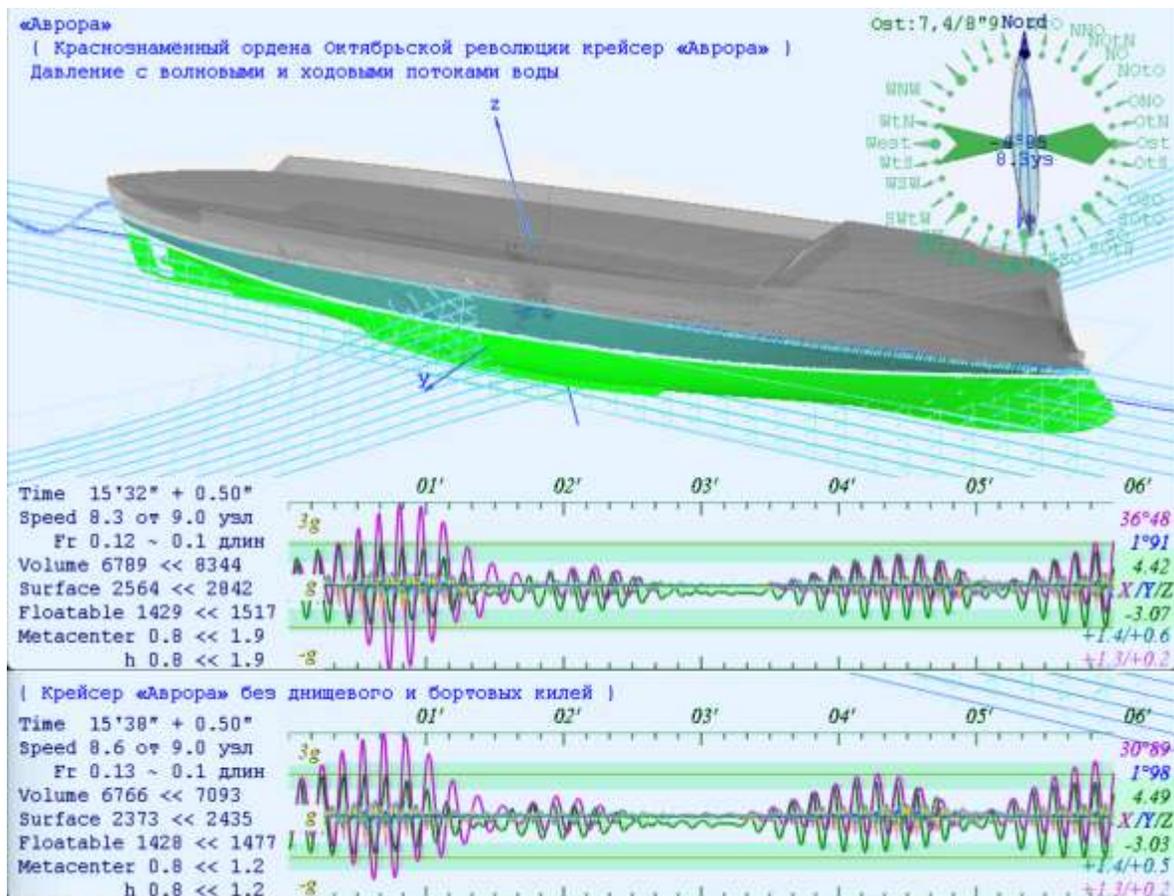


Рис. 75. Синхронный вычислительный эксперимент с мореходными испытаниями крейсера «Аврора» с чистым корпусом – нижние графики; с днищевым и бортовыми килями, и кормовым рулём – верхние графики качки. Курс лагом к волне с длиной, равной длине корпуса, и высотой волны равной осадке крейсера.

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 объёмными килями, в результатах опытовых испытаний пересиливают неблагоприятные эффекты иного рода. Экстремальные углы бортовой качки возрастают с $30^{\circ}9$ до $36^{\circ}5$ (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. 75, *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 опытовых 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 потоку⁵¹.

По умолчанию в программном комплексе «Аугога» используется коэффициент $k_v = 0,5$, что в вышеописанных опытах снижает отличие мак-

⁵¹ Взаимокомпенсация давлений относительно нормалей к набегающим потокам вблизи подводных крыльев и на кавитирующих реданах регулируется коэффициентом $k_v \in [0 \div 1]$

симильных 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 – демпфирующих успокоителей качки, так как в случае фактора взаимокомпенсации отрицательных давлений $k_v = 0,5$ в экспериментах с идеально отработанными обводами крейсера «Аврора» не выявлялось особо значимых различий.

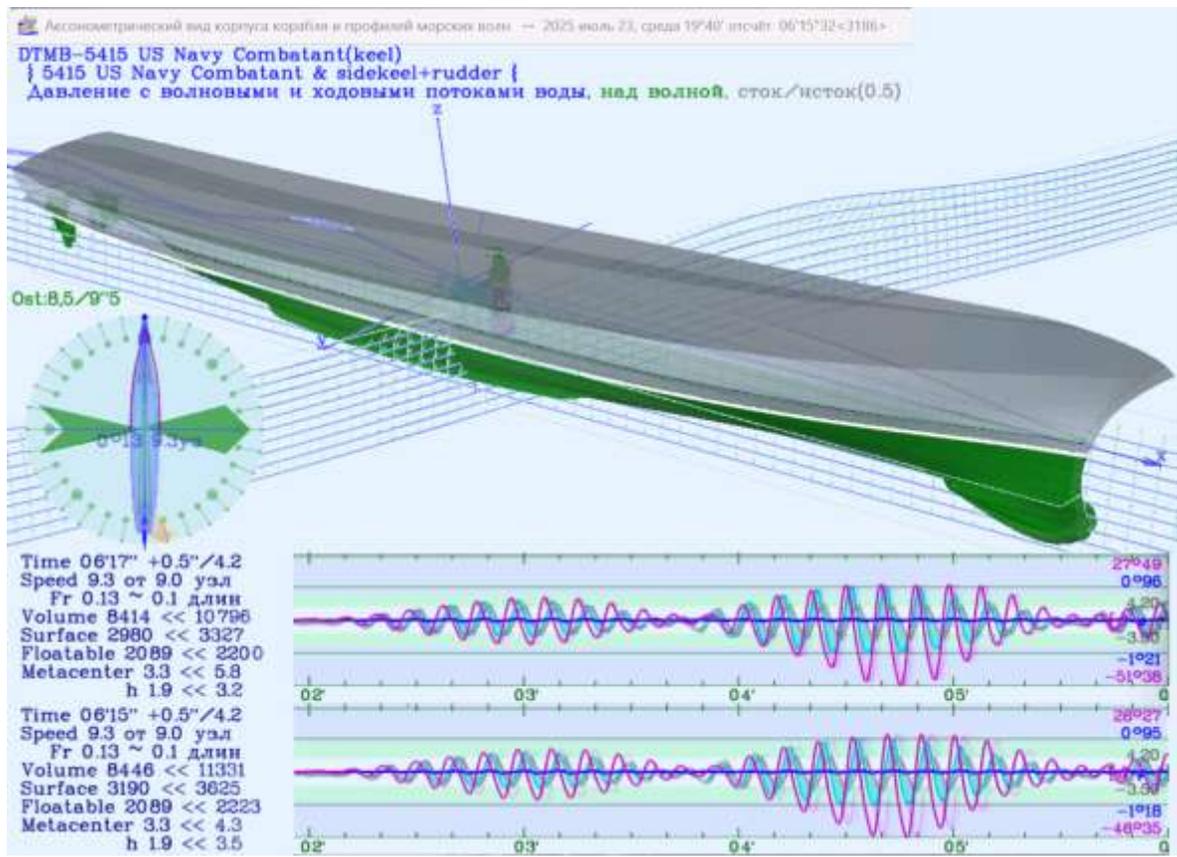


Рис. 76. Аналогичные синхронные испытания для опытового корабля DTMB-5415. На верхних графиках корабль с бортовыми килями и кормовыми рулями, нижние – для чистого корпуса.

Корпус корабля ДТМВ-5415 (Рис. 76), 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 на тихой воде и, как следствие, умеренно ослабленное силовое взаимодействие с морским волнением.

В сравнительных экспериментах может автоматически устанавливаться длина штормовой волны по отношению к длине корпуса, с крутизной волновых склонов такой же, как в экспериментах с крейсером «Аврора», с метацентрической высотой 5 % от ширины корпуса. Однако, в таких условиях корабль довольно быстро опрокидывается.

Для ослабления силового воздействия штормовых волн в эксперименте с кораблём ДТМВ-5415 пришлось отменить опцию увлечения корпуса быстрым потоком в гребне штормовой волны, а также вдвое увеличена метацентрическая высота до 1,9 м, до уровня 10% ширины корпуса.

Отличие в измерениях величин качки в результатах приблизительно в пределах погрешностей проведения экспериментов. Но всё же здесь корпус с выступающими частями реально демпфирует бортовую качку, которая становится несколько меньшей в любых условиях штормовых опытов. При этом, корабль без бортовых килей, ввиду отсутствия демпфирования резких ударов волн, раскачивается сильнее и опрокидывается быстрее корабля с выступающими бортовыми килями и кормовыми рулями.

Практическая отработка процессов гидромеханики на выступающих частях и бортовых килях также необходима, и вполне возможна в составе вычислительного комплекса «Aurora», но такие работы целесообразно выполнять после построения наилучшей по мореходным качествам формы корпуса, и лишь в такой последовательности проектирования актив-

ные 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 Фрудру: $Fn \approx 0,22_{\min}, 0,24^{\max}, 0,26_{\min}, 0,3^{\max}, 0,33_{\min}, 0,48^{\max}$ и 0,8 - контрольный, строго по экстремумам на кривой волнового сопротивления – интенсивности волнообразования;

$\zeta \{ 2 \}$ – два варианта предельно высокой и относительно малой интенсивности морского волнения задаётся в долях от теоретического максимума гребня трохoidalной волны⁵² – 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.

⁵² В варианте $A = 1,0$ с обрушающимся гребнем штормовой волны случается быстрое и непредсказуемое опрокидывание корабля – захват вихревым потоком.

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

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 опытовых 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.

Таблица.

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

Имя	$L_{\text{КВЛ}+\text{макс}} / \sqrt{B_{\text{КВЛ}+\text{макс}}} / T_{\text{макс}}$	$W / S / \delta$	$\Delta h - g^\circ$
Крейсер «Аврора»	124 ₊₃ / 16,8 / 6,4	6758,2 / 2355 / 0,508	0,46~61
Корвет А-1201	88,6 _{+1,4} / 9 ₊₁ / 4 ₊₁	1863,3 / 1005 / 0,584	0,33~59
МИДВ-1985 (/ 2)	116 ₊₁₄ / 10,7 _{+5,3} / 8	7520,8 / 2787 / 0,756	1,41~rad
Steamship «Victory»	135,3 _{+3,4} / 18,9 / 8,5	14627 / 2750 / 0,672	0,31~43
СРТМ-К пр.502-ЭМ	52 _{+2,4} / 9,8 _{+0,15} / 3,8 _{+0,5}	1267,3 / 753 / 0,571	0,12~48
Спасатель А-1202	60 _{+1,8} / 10,3 _{+0,1} / 5 ₋₁	1712,4 / 834 / 0,571	0,27~105
Лидер «Ташкент»	134 ₊₆ / 13,7 _{-0,6} / 4	2957,4 / 1630 / 0,422	0,03~35
«Буревестник»-1135	113 ₊₁₀ / 13,2 ₊₁ / 4,2 _{+2,7}	2915,1 / 1610 / 0,487	-0,34~rad
DTMB-5415 USNavy	142 ₊₁₁ / 19,1 _{+1,4} / 6,15 ₊₃	8418 / 2975,6 / 0,507	-1,00~rad
ONR-5613 «DDX»	154 ₊₂ / 18,8 / 5,49 _{+2,1}	8524,4 / 3197,4 / 0,536	-0,88~rad

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

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

T – расчетная осадка [м]

W – водоизмещение на тихой воде [м³]

S – площадь смоченной обшивки [м²]

δ – коэффициент общей полноты [8]

Δh – максимум по S-образной диаграмме по углу крена, или
– отсчёт плеча остойчивости по углу крена в 1 ~ рад (h) [M]

Все мореходные вычислительные эксперименты проводятся на нерегулярном волнении с размерениями $\lambda_w = L$ [M] относительно длины корпуса корабля для наиболее крутых или свежих ветровых волн. Волны зыби по длине $\lambda = 1,75 \cdot L$ [M] и высоте 0,4 от максимального гребня, и океанские (реликтовые) валы длиннопериодной зыби по длине $\lambda = 2,5 \cdot L$ [M] с относительной высотой 0,2, соответственно.

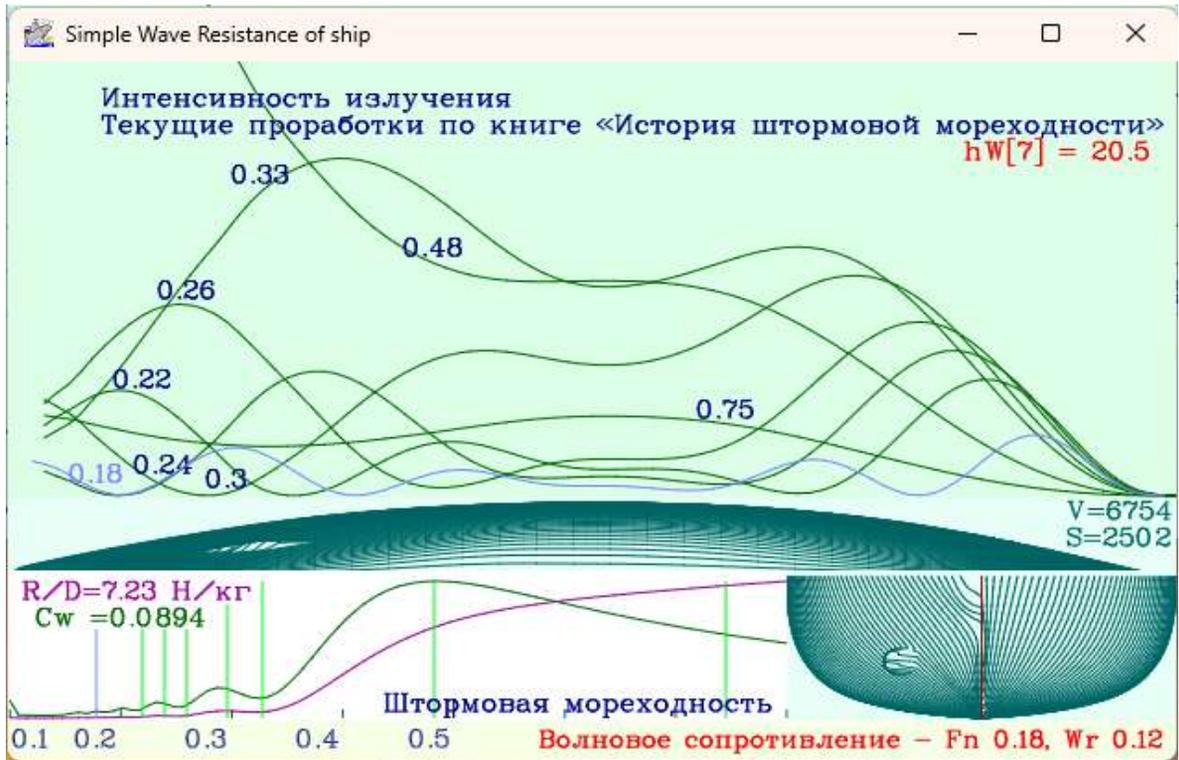


Рис. 77. Подборка характерных скоростей хода по экстремума интенсивности корабельного волнообразования. Очень важный минимум на скорости $Fn \approx 0,33$ отвечает за компенсацию расходящейся волны в варианте клиперских обводов по носовой скуле, закручивающей набегающей поток под днище корабля.

При установке параметров испытываемые модели должны синхронно проходить по одинаковым групповым структурам морских волн, с визуальными наблюдениями по мере возможности для сопоставления резуль-

татов по 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 начинают различаться. Для всех числовых моделей кораблей и судов первые опыты выполняются с нулевой метацентрической высотой, что важно для оценок качества проектирования обводов и формы корпуса корабля в целом.

Таблица.

Выбор скорости хода корабля по экстремумам интенсивности корабельного волнообразования (Рис. 77).

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	14,9	16,3	17,6	20,3	22,4	32,5	54,2	124
Корвет А-1201	0,157	12,6	13,8	14,9	17,2	18,9	27,5	45,8	88,6
МИДВ-1985(/2)	0,137	14,4	15,7	17,0	19,7	21,6	31,5	52,4	116
Steamship «Victory»	0,127	15,6	17,0	18,4	21,2	23,4	34,0	56,6	135,3
СРТМ-К пр.502-ЭМ	0,204	9,69	10,6	11,5	13,2	14,5	21,2	35,3	52,4
Спасатель А-1202	0,191	10,4	11,3	12,3	14,1	15,6	22,6	37,7	60
Лидер «Ташкент»	0,128	15,5	16,9	18,3	21,1	23,3	33,8	56,4	134
«Буревестник»–1135	0,139	14,2	15,5	16,8	19,4	21,4	31,1	51,8	113
DTMB-5415 USNavy	0,124	16,0	17,4	18,9	21,8	23,9	34,8	58,0	142
ONR-5613 «DDX»	0,119	16,6	18,1	19,6	22,7	24,9	36,3	60,4	154

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

(Группировка вычислительных экспериментов выполняется по двум параметрам: курсу и скорости хода).

В отличие от тихой воды, в условиях морского волнения обретаются и проявляется необходимый запас остойчивости, полезность и уровень которой весьма сложно обосновывается в гидростатике тихой воды.

Номинальной скоростью штормового хода в испытаниях устанавливается 9 узлов, при которой корабль безударно и без слеминга маневрирует в условиях интенсивного волнения.

Ход выбирается по экстремумам волнового сопротивления, и по возможности проверяется режим движения с максимальным волнообразованием на скорости по Фруду $Fn \approx 0,48$, с поперечной корабельной волной значительно большей длины корпуса корабля. Последовательно рассматриваются особенности штормового маневрирования корабля в рамках предвычисленных в таблице гидрографических условий на открытых морских акваториях.

Первая серия экспериментов с крейсером «Аврора» с метацентрической высотой 5% от ширины корпуса, на скоростях хода: 9 узлов 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.

В проведении вычислительных экспериментов предусматриваются варианты предельно опасного волнения с длиной прогрессивной трохoidalной волны равной $\lambda = L$ длине корпуса корабля, при максимальных высотах гребней и скоростей потоков в гребнях волн.

В таких условиях безопасным курсом считается штормование носом на волну предельно малыми ходами, достаточными для удержания курса. Корабль во взаимодействии с гребнями встречных волн может терять скорость движения вперед, что будет означать потерю управляемости, и для возврата корабля на заданный курс будет требоваться увеличение тяги главных двигателей и большая перекладка руля на борт или на полборта, предусмотренных в комплексе «Аврора».

Корвет-1201 – корабль гидрографической и патрульной службы

Специальная отработка обводов Корвета-А1201 выполнялась по наставлениям и в ограничениях технического предложений от капитана I-ранга Сергея Ивановича Кроленко, преподавателя кораблестроительного отделения Ленинградского Высшего военно-морского инженерного училища⁵³.

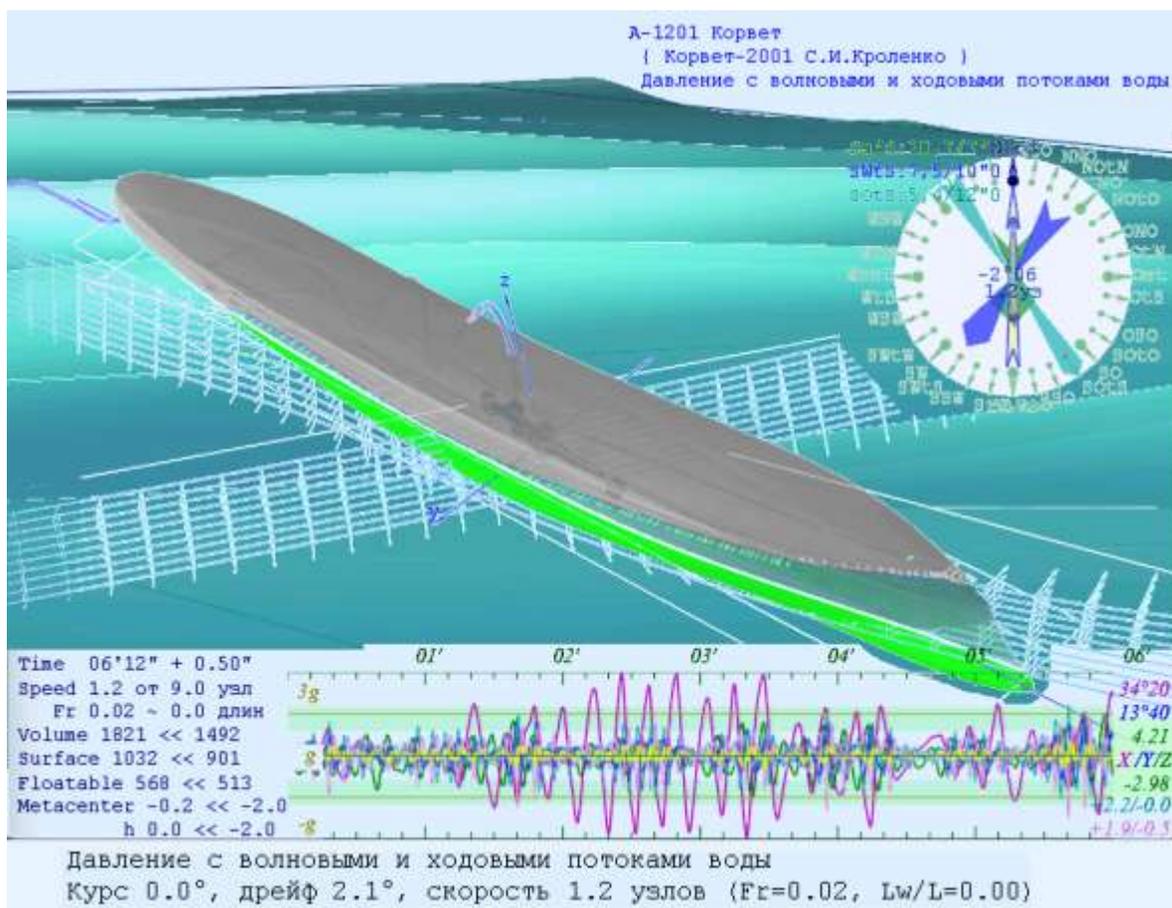


Рис. 78. Корвет-1201 на штормовом курсе носом на волну. Метациентрическая высота $h = 0$.

Штормовые условия для корабля среднего водоизмещения никак не ограничиваются крутизной и высотой океанской волны. Океанское плава-

⁵³ Учреждено в 1798 году Императором Павлом-I как Училище корабельной архитектуры. Ныне Училище имени Феликса Эдмундовича Дзержинского.

ние и несение службы на экстремально интенсивном волнении вполне естественно для корабля гидрографической и патрульной службы среднего водоизмещения. 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 и ожидалось, подтверждаются удовлетворительные показатели штормования и 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, $\alpha = 0.40$, 15.7 м/с, 214° ,
 Вал: 225 м, 12.0'', 5.37 м, $\alpha = 0.20$, 18.7 м/с, 146° .

Свежая зыбь и пологие валы от далёких штормов в проводимом вычислительном эксперименте устанавливаются весьма высокими, однако они не приносят ударных скоростных нагрузок при отражении от корпуса корабля, внешне воссоздавая лишь заведомо нерегулярный характер морского волнения, что отображается в графическом окне (Рис. 78) морского волнения.

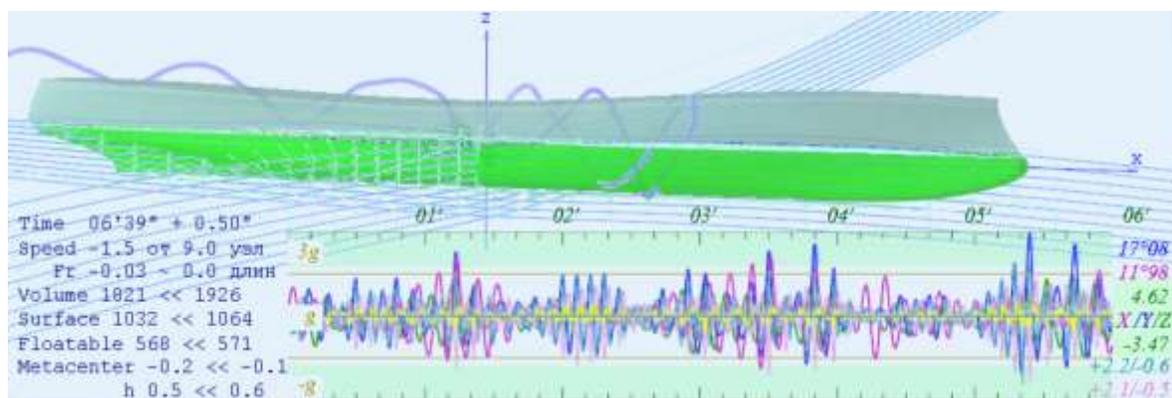


Рис. 79. Корвет на штормовом курсе носом на волну. Метacentрическая высота $h = 0,5$ м. Углы дифференца $17^\circ 08$ больше углов крена $11^\circ 98$.

В протоколе эксперимента отмечено (Рис. 79), 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 накатила на носовую палубу в момент схода корпуса с предыдущего гребня, возникла потенциальная опасность быстрого приведением корпуса лагом к волне. На скорости хода более 9 узлов, корабль заныряет под волну, и опасный сценарий может осуществиться. Учитывая абсолютный запас остойчивости Корвета, он лишь сильно отклоняется от курса с большим креном на правый борт.

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: $\vartheta = +8^\circ 2$;

$T = 09'53''$, сброс хода до $\xi = -1.6$, и медленный набор скорости при возврате 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 $\vartheta = \pm 12^\circ$ 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 собст-

венных 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 устойчивости.

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: $\vartheta = -30^\circ 8'$, 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 устойчивости 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 устойчивостью $h = B \times 5\% = 0,5$ 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].

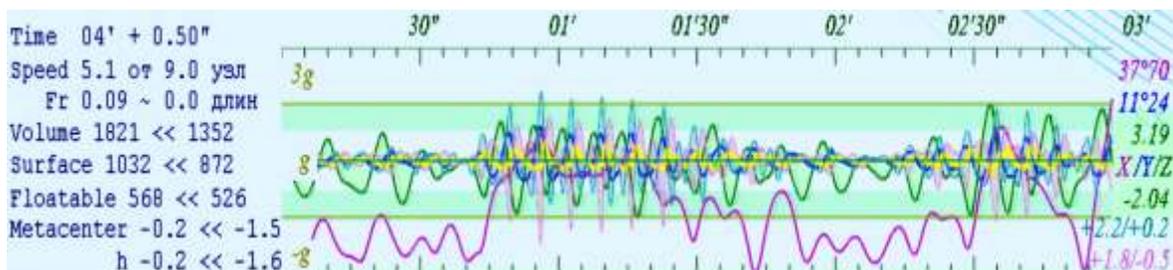


Рис. 80. Корвет без положительной устойчивости. Метacentрическая высота $h = -0,25$ м. На интенсивном волнении корабль спрямляется, при ослаблении внешних воздействий корабль лишь отчасти кренится по усредненной диаграмме устойчивости.

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 гид-

ростатические качества с проявлением положительной остойчивости при любом изменении углов крена или действующей осадки в условиях вертикальной качки на волнении.

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: $\vartheta \approx -30^\circ$.

На графиках состояния корабля (Рис. 80) 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.

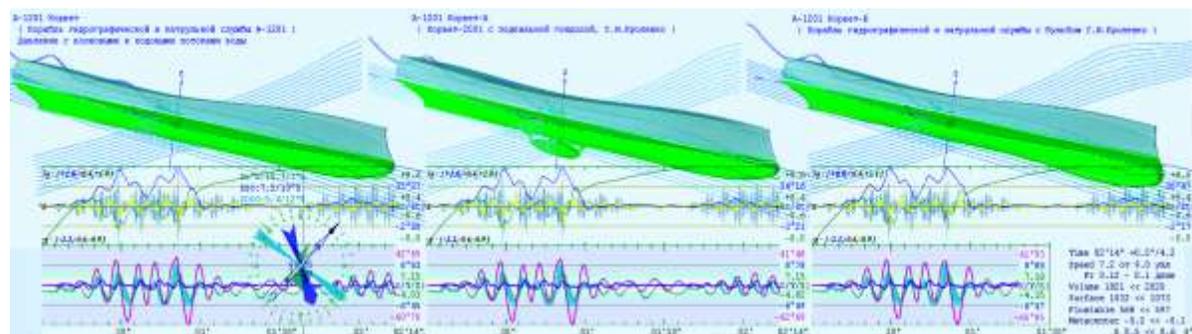


Рис. 81. Три варианта корабельных обводов для Корвета-1201: со штормовым подрезом у эволюционно отработанного форштевня – слева; с подкильной гондолой вместо носового бульба – посередине; с носовым бульбом для гидроакустической станции и заглублённым штормовым подрезом форштевня – справа.

Дополнительные вычислительные эксперименты проводились в режиме синхронных испытаний Корвета А-1201 в вариантах со штормовым подрезом форштевня, с опускаемой под днищем гондолой и носовым

бульбом гидроакустической станции (Рис. 81). 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, в проведённых экспериментах 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 услов-

ная 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 ослаблено, что в штормовом плавании способствует комфортным условиям обитания, с постоянной готовностью экипажа к проведению морских операций по предназначению корабля.

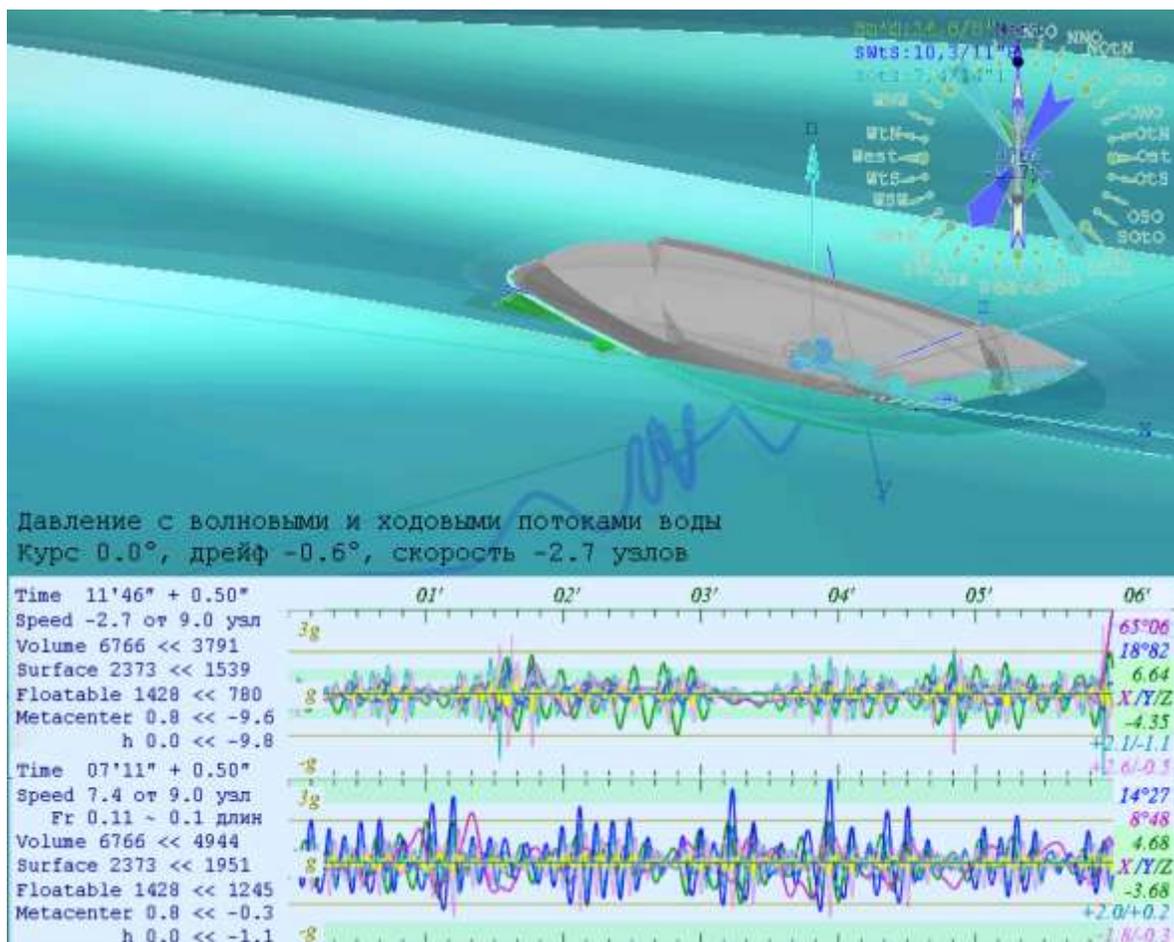


Рис. 82. Критический момент штормования носом на волну для крейсера «Аврора». В момент подъёма корпуса над впадиной между гребнями волн, крен на правый борт достигает 65° без усиленной килевой качки и заметного рыскания на курсе.

В отношении 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 необходимом запасе поперечной остойчивости, в чем «Аврора» также несколько уступает в сравнении по качеству целенаправленной отработки обводов «Корвета-1201».

Рассматриваются 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, $A = 180^\circ$,

Зыбь: 216 м, 11.8'', 10.34 м, $\alpha = 0.40$, 18.4 м/с, 214°,

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

Как и ожидалось, крейсер «Аврора» (Рис. 82) поначалу прекрасно идёт навстречу предельно крупному свежему ветровому волнению ($\lambda = 124$ м, $\tau = 8''9$, $\zeta = 14,75$ м, $C = 13,9$ м/с) углы крена не превышали $\vartheta \approx 7^\circ \div 8^\circ$ 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 $\zeta = -0,8$ узлов, и затем до $\zeta = -1,4$ 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 возобнов-

ления хода вперёд, 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. 82).

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 трохoidalной волной, или своеобразный брочинг 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 накренивание 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, оставливаясь 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 завершая катастрофический эксцесс к моменту времени $T = 12'10''$, при умеренном крене на правый борт $\vartheta = +17^\circ 7$. «Аврора» снова плавно набирает ход вперёд с обретением управляемости под действием авторулевого, и в 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 в обратное движение в течение $37''$ секунд, при этом скорость обратного дельфинирования возрастает до $\xi = -5.3$ узлов, что в принципе чрезвычайно опасно еще и по причине обратного действия рулей.

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

Даже по подробному протоколу вычислительного эксперимента не просто опознать причину захвата корпуса «Авроры» гребнем волны 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 су, $-1,8 \times g$ [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 нарушит 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 $\zeta = +6,5$ м.

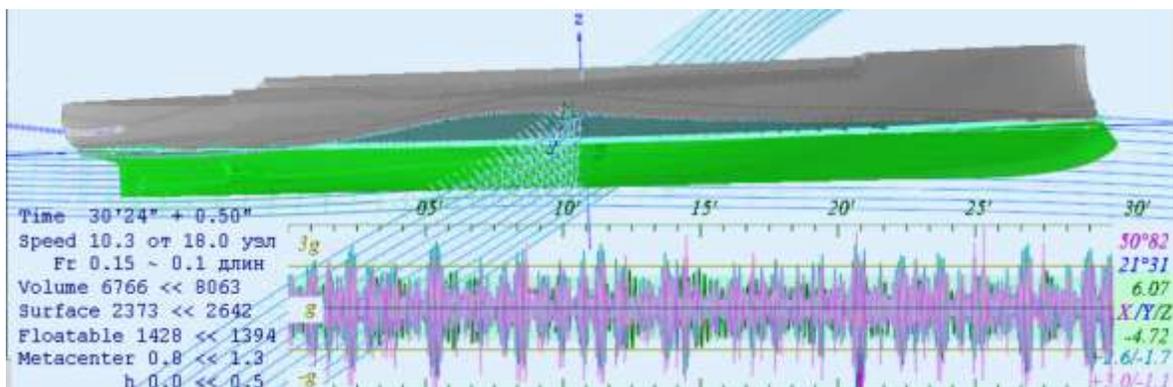


Рис. 83. Штормование крейсера «Аврора» носом на волну полным ходом не исключает бортовой качки до углов крена более 50°.

Крейсер «Аврора» при штормовании может держать полный ход (Рис. 83), 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 $g \times +0,66$ [м/с²] – 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 трохoidalных 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 трохoidalных волн. При небольшом снижении центра тяжести корабля для получения положительной начальной устойчивости, опасность опрокидывания корабля значительно снижается.

«Углекаменск» - средний рыболовный траулер морозильный, кормового траления

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 широко-корпусного 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 «Аугога», 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 уточнённых 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.

Первый опыт с траулером проводился при нулевой начальной устойчивости. В отличие от крейсера «Аврора», для которого всегда возникает положительная устойчивость при любом изменении крена или осадки, у траулера S-образность диаграммы Рида нивелируется отрицательной устойчивостью при небольшом подвсплытии корпуса под действием вертикальной качки.

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°.

Нулевая начальная устойчивость сразу отмечается апериодической бортовой качкой (Рис. 84), 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 объема 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 втроекратно главная палуба погружается ниже уровня моря, от этого траулер неумолимо кренится на левый борта, где задерживается толстый слой забортной воды и траулер опрокидывается.

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

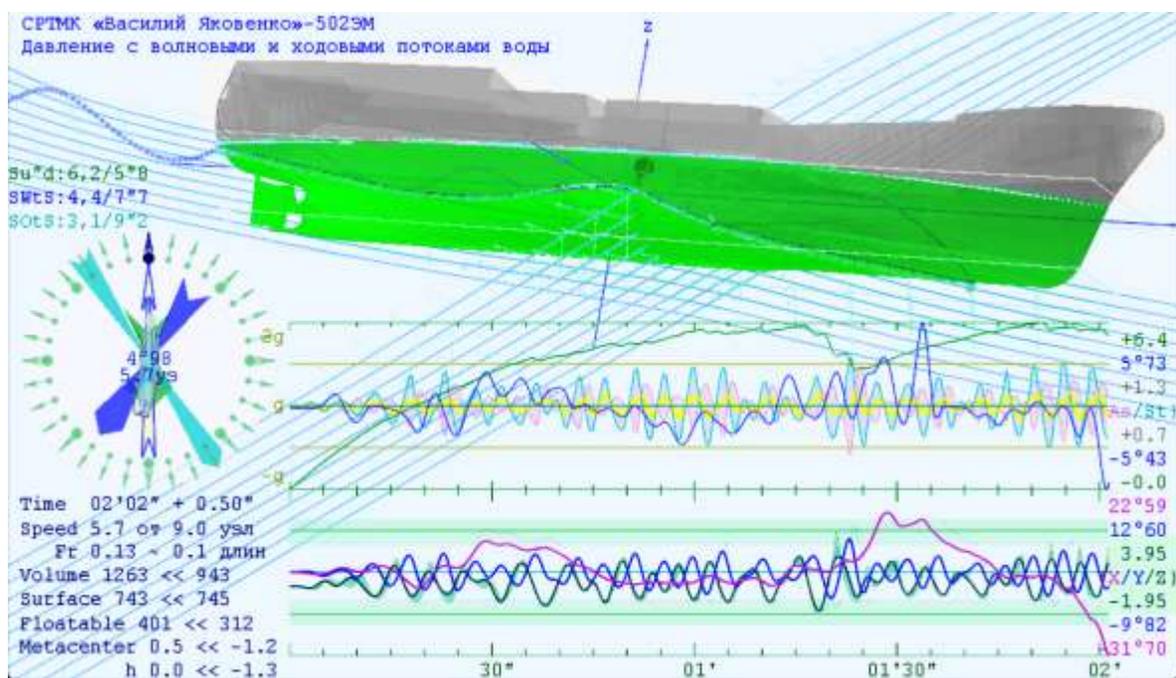


Рис. 84. Траулер «Углекаменск» обладает очень малым запасом остойчивости при нулевой метацентрической высоте. Интегрирование осреднённого пучка диаграмм остойчивости с волновыми воздействиями приводит к аperiodической бортовой качке, и создаёт надежду успешного штормования носом на волну при умелых действиях рулевого и вахтенного штурмана. На второй минуте, после трёхкратного погружения корпуса ниже гребня волны с заливанием открытой главной палубы, малый запас остойчивости и весьма высокая восстановленная скорость воздействия гребней встречных волн, приводят судно к опрокидыванию через левый борт.

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.

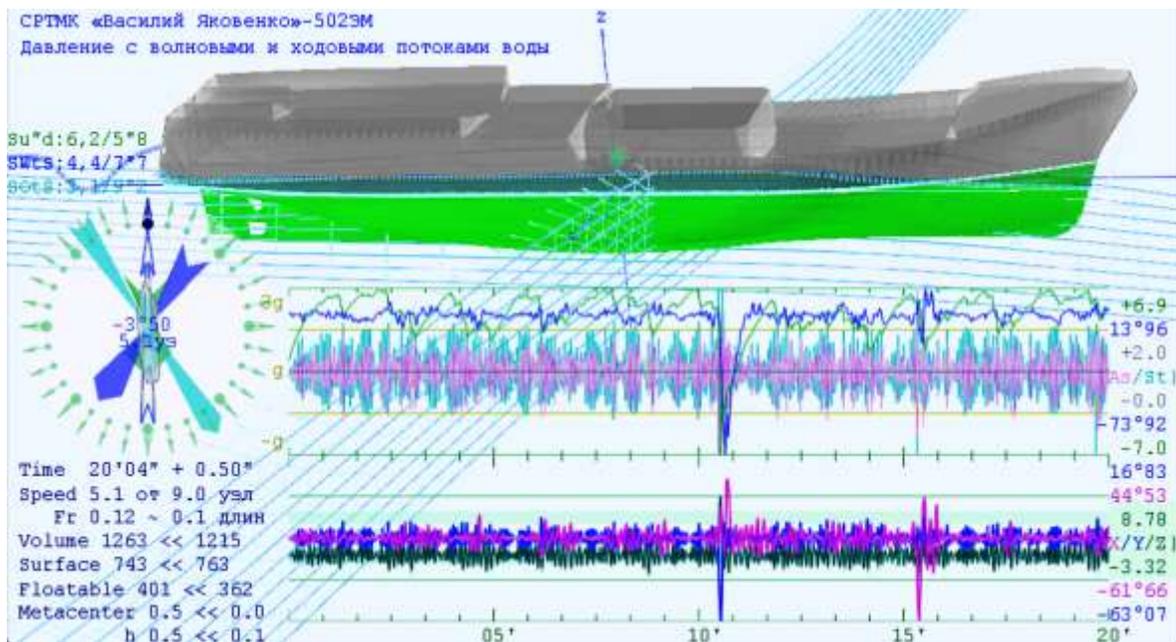


Рис. 85. *Вполне успешное штормование траулера «Углекаменск» при небольшой положительной начальной метацентрической высоте $h = 49$ см, полным ходом 9 узлов носом на волну. Очень показательны процессы ходкости и качки при удержании заданного курса в условиях нерегулярного морского волнения, в данном 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.*

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 оконечности 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

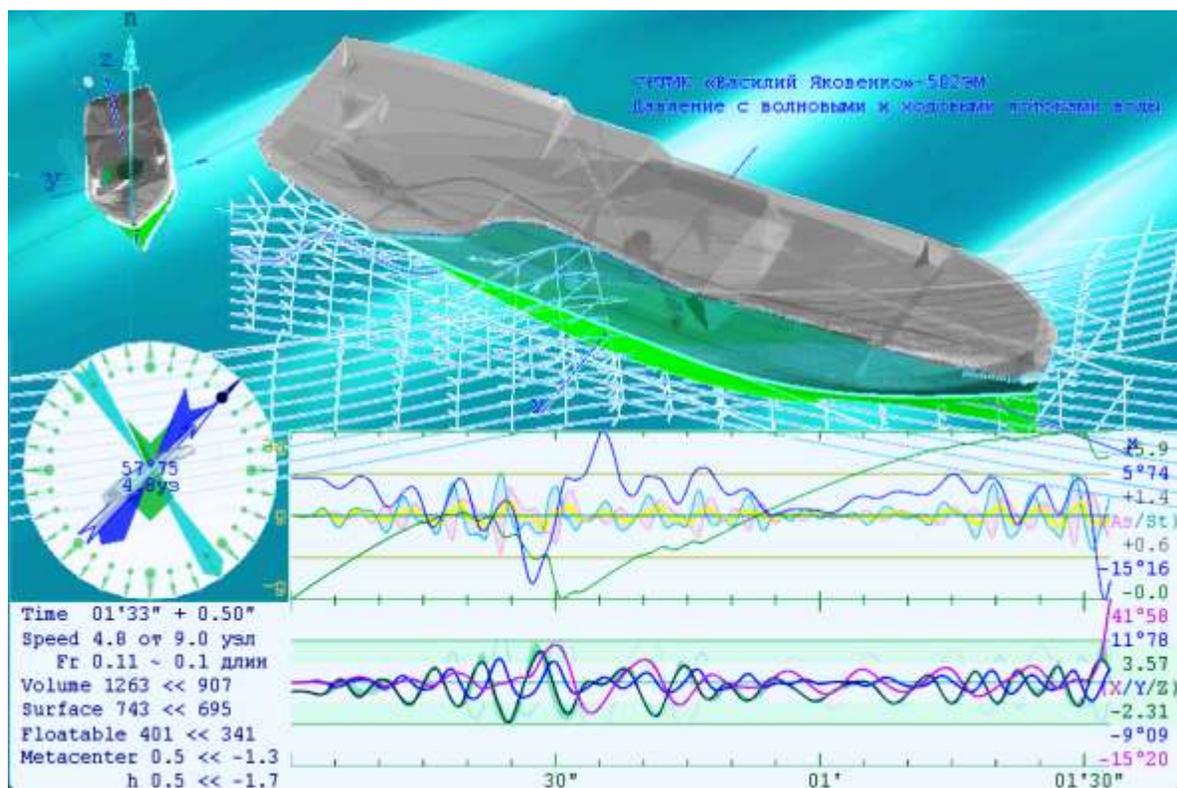


Рис. 86. На курсе вразрез свежей ветровой волне траулер дважды захватывается встречной волной, каждый раз при сильном рыскании под волну теряет ход. Вторая встреча с гребнем волны через полторы минуты штормового хода заканчивается сильным зачерпыванием гребня волны на главную палубу, и опрокидыванию через правый борт.

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 рыскание на курсе, и потому потери хода уже не столь существенны.

Возможен и допустим ли для среднего траулера (Рис. 86) 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 почтой 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. Пред-

варительные опыты показывали, что при большей метацентрической высоте качка становится настолько резкой, что неожиданная опасность и непредсказуемость момента опрокидывания корабля только возрастает.

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.

Режим волнения по аналогии определяется геометрическими размерениями относительно длины корабля по ватерлинии, с заданными углами склонов 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° .

Сразу по началу эксперимента проявляются знакомые особенности штормового плавания с необходимостью навигационного учёта значительного угла бокового дрейфа. В условиях умеренной бортовой и усиленной килевой качки регулярно возникают ударные перегрузки в оконечностях корабля (Рис. 87), 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 м/с), либо при жестких ударах плоского кормового подзора о поверхность воды, которые, также как и в проводимом вычислительном эксперименте, могут усиливается при ослаблении интенсивно-

сти скоростного потока под кормовым подзором в зоне действия гребных ВИНТОВ.

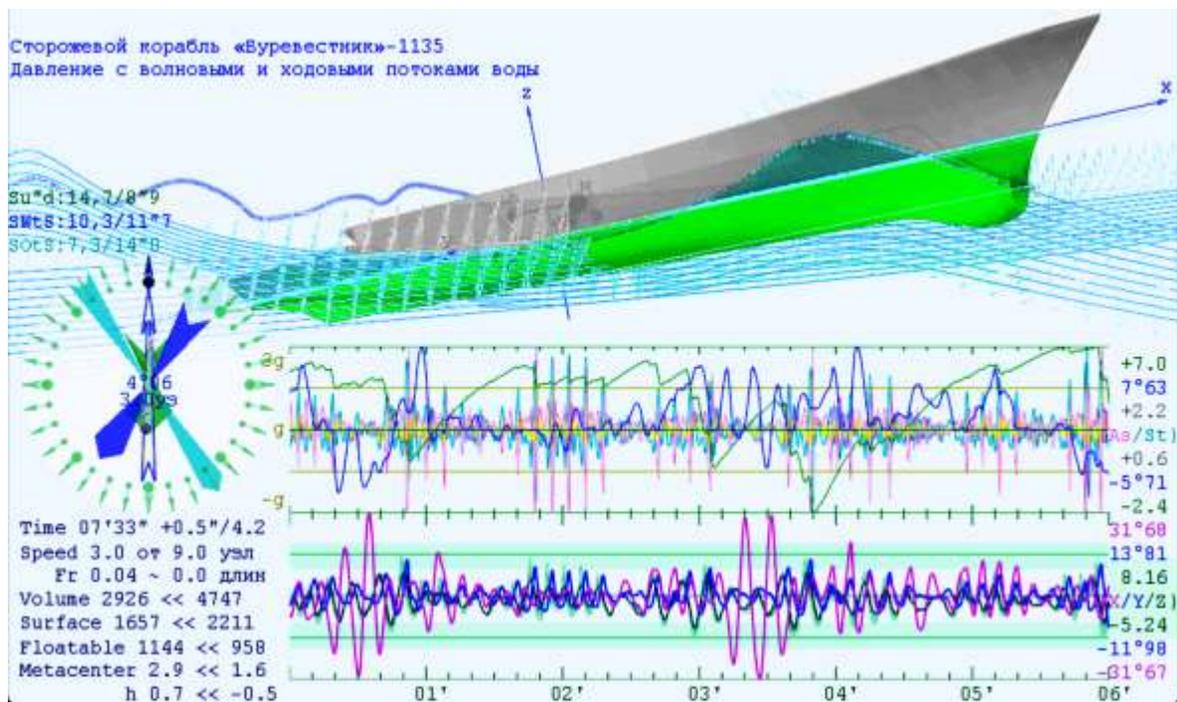


Рис. 87. Корабль на штормовом курсе носом на волну разгоняется до скорости 7 узлов. Гребень девятого вала подбрасывает нос корабля вверх, отчего возникает эффект дельфинирования назад с гребня волны со скоростью -6,3 узла.

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 $\vartheta = -100^\circ 7'$.

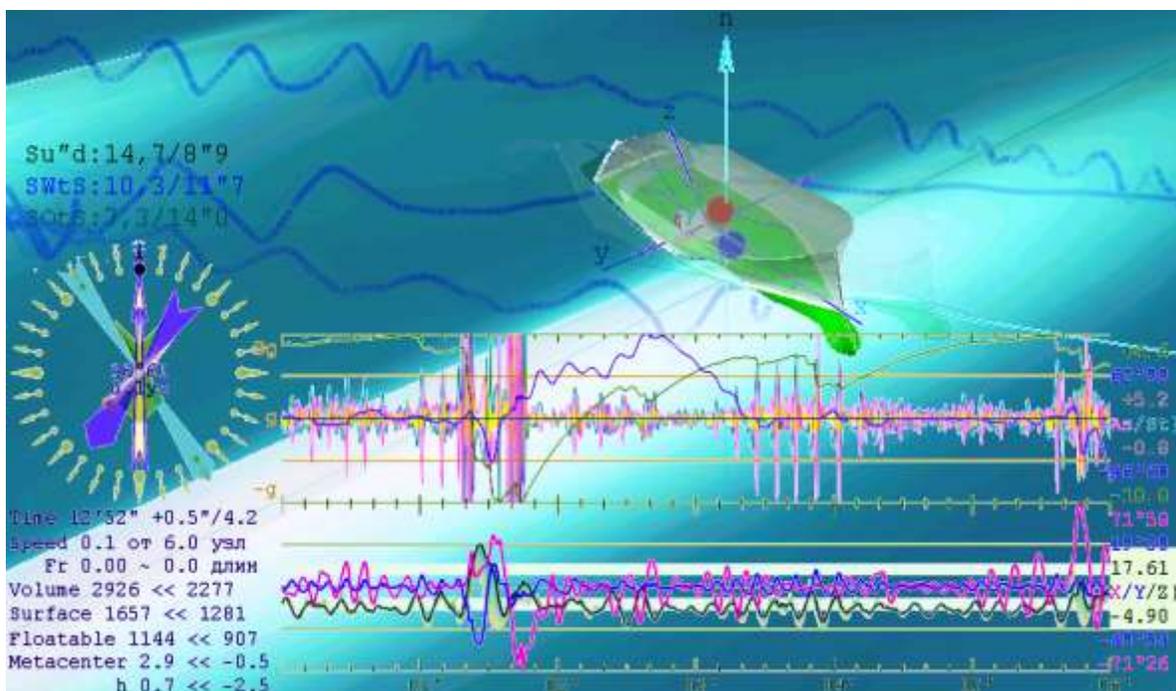


Рис. 88. Штормовой эксперимент с меньшей скоростью хода корабля. Опасность катастрофы в штормовом плавании «Буревестника» без активного маневрирования с умелым управлением ходом и курсом корабля не снижается.

На отсчёт времени $T = 07'48''$ корабль оказывается лагом 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. 87), быстро теряет ход. Затем носовая оконечность корабля быстро падает с большой высоты, и принимает на высокую верхнюю палубу весь гребень следующей штормовой волны, происходит захват корпуса уклонением от курса в положение лагом к волне,

после чего в вихре высокого гребня трохоидаальной волны корабль опрокидывается.

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 трохоидаальной волны в фазе интенсивной килевой 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 ходкости корабля по тихой воде.

По графикам качки не отмечается заметного снижения вертикальных ускорений в оконечностях. На 8'-й минуте корабль снова скатывается со встречной волны задним ходом со скоростью более 18 узлов, и это еще не достигает режима дельфинирования при скорости набегающей прогрессивной волны в 27 узлов. Затем в течение двух минут корабль медленно возвращается на заданный курс. Бортовая качка в момент захвата корпуса волной достигает 72° градусов по левому борту.

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 сдерживается на величине 7,3 узлов, но теперь это после быстрого сваливанием корабля на курс лагом к волне, что влечет за собой катастрофу с опрокидывание корабля через правый борт. В отличие от крейсера «Аврора», способного

до последнего бороться с закручивающимися потоками воды под обрушающимися гребнями девярых валов, современный корабль всё же проектировался под естественное положение на поверхности моря кверху килем...

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 восхождения 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 нереально. Да и такое маневрирование принципиально невозможно при плохой видимости или ночью.

Безопасное движение вразрез волне для «Буревестника» столь же нереально по причине широкой транцевой кормы и огромной развесистой над водой носовой оконечности. Для хода лагом к волне, подобно речным лодкам и древним лодиям, будет мешать чрезмерная бортовая качка, от чего могут возникнуть проблемы с общей прочностью корпуса. Резкая качка от сильно завышенной метацентрической высоты может грозить опрокидыванием кораблю по причине огромных угловых скоростей при бортовой качке.

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 заблаговременного ухода в укрытие. На Курилах столь быстроходный корабль может заблаговременно укрываться за подветренной стороной островов, где трохоидальные волны глубокой во-

ды угасают, а тягуны шельфовых волн не смогут затянуть на мелководье корабль на ходу под столь мощными машинами.

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 мостике 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 навстречу волнению.

Для полнокорпусных траулеров, например, такое штормование всегда означает дрейф обратным курсом по волне кормой вперед, 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° ÷ 40° 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 тра-ления «Углекаменск». Вышеприведённые вычислительные эксперименты со штормованием носом на волну также выявляли возникновение катастрофической гидромеханики этих кораблей при отклонении от курса на те же 3-4 румба, и потому эти два корпуса снимаются с дальнейших заведо-мо опасных опытов.

Формально любой корабль с достаточной маневренностью и мощно-стью 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 хо-рошей морской практики», и/или умение грамотного использования на-ставлений мореплавателям по эффективному и безопасному управлению кораблём в сложных и штормовых условиях.

И если морская практика удел для особо посвященных мореплавате-лей, 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 про-извольных групповых структурах интенсивного трохoidalного морского волнения под ураганскими ветрами.

Штормовой ход вразрез волне востребуется для управляемого дви-жения в заданном географическом направлении, что особо важно, напри-мер, при спасении корабля от опасного дрейфа в сторону навигационных

опасностей, или при уклонении от попадания в толчею стоячих волн в центре тайфунов и циклонов. Однако, именно на таком курсе провоцируется захват корабля штормовой волной с наибольшей опасностью опрокидывания в вихре крутой трохоидаальной 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 поддержания интенсивного управляющего потока на кормовых рулях, не подавляемого скоростным потоком в гребнях штормовых волн, представляется лишь наиболее эффективным режимом хода с комфортными 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 опытовых 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 опытовых экс-

периментов, с использованием ключевых выводов из мореходных испытаний гипотетических (МИДВ-85), типовых (Серия-60) и эталонных обводов («Victory») судов в гравитационной системе на регулярном волнении опытового 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 $\lambda = L_{\text{KWL}} = 160$ м и высоте $\zeta = 19,1$ м; с зыбью 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 $W = 25\,000$ м³ 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 длин морских волн, и где групповые структуры с центральными девятиными валами быстро трансформируются в регулярные последовательности кноидальных гребней с предельно закрученными (не только завихрѐнными) потоками в обрушающихся гребнях волн.

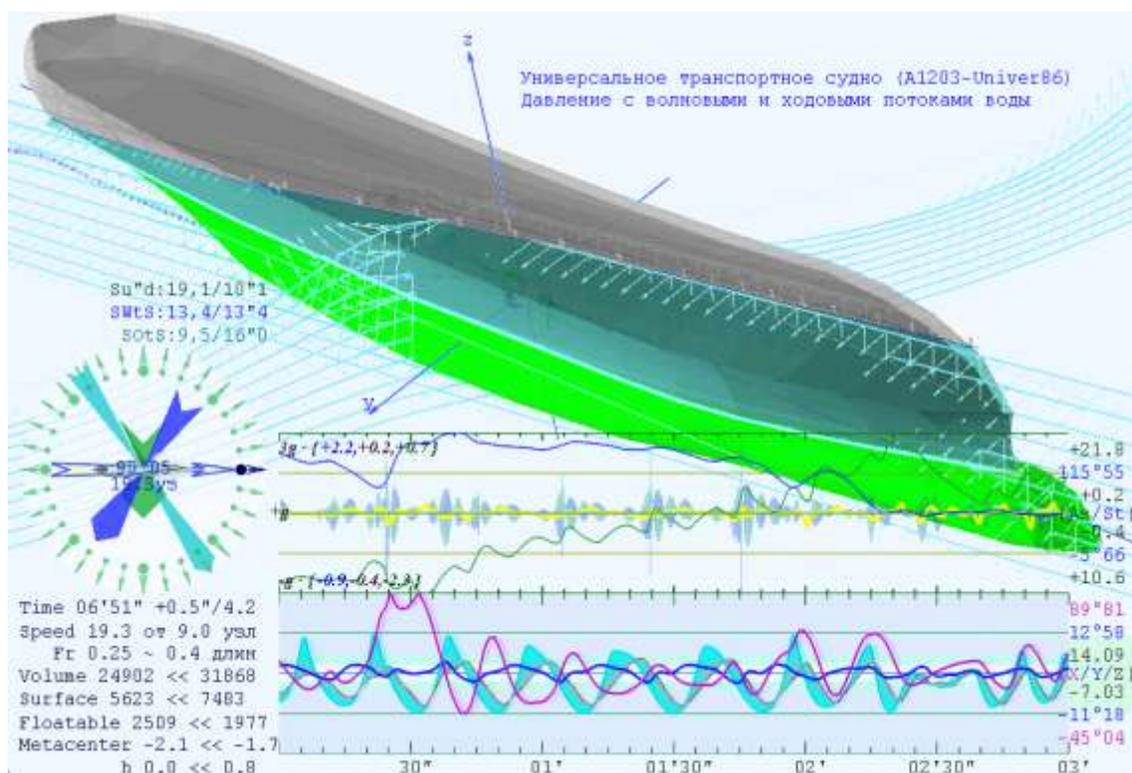


Рис. 89. Дельфинируя на склонах волн транспортное судно разгоняется с $V = 9$ до $V \approx 21$ узлов, и на отметке в 30" секунд с полного хода ложится на правый борт $\vartheta = 96^\circ$. С возвратом на исходный курс лагом к волне левого борта качка стабилизируется в пределах $\vartheta \approx \pm 45^\circ$.

По записям в протоколе эксперимента получается погружение средней части корпуса под воду почти на 12 м, судно просто не успевает всплывать из под гребня волны, поднимающегося вверх с ускорением до

g - свободного падения. По выходу гребня волны на верхнюю палубу возникают отрывы потоков на сломах и гидродинамические удары на плоских поверхностях, которые в рамках используемой численной модели аппроксимируются упрощёнными законами гидромеханики (и гидроупругости), что отмечается ударными ускорениями в общем движении.

К сожалению, в эксперименте ещё не отработаны особые условия подводного плавания, которые могли бы аккуратно выводить корпус с надстройками из состояния глубокого погружения под гребнями стремительно движущихся штормовых волн, хотя в целом режимы всплытия под действием гидростатических сил должны отрабатывать вполне корректно.

Универсальное транспортное судно Univer-86 обладает ярко выраженной S-образностью диаграмм остойчивости (Рис. 13) с быстро возрастающей метацентрической высотой при любом изменении крена или осадки. 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. 89) 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 всплывать 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 пло-

ских 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 заныряние 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 меньше: $a \approx +2 \cdot g$, тогда как при падении носовой оконечности под волну «невесомость» усиливается втрое 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 девярых валов, штормовое плавание ожидается будет много благополучнее.

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.

Таблица

Экстремальные значения параметров состояния в двух испытаниях 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
Средняя от 9 узл скорость	$V_{CP} = 6,03$ узлов	7,38 узлов
Рыскание на курсе, дрейф °	$\pm\chi$ $6^\circ 11 < +0^\circ 43 > -5^\circ 26$	$3^\circ < +0^\circ 21 > -1^\circ 65$
Вертикальная качка, м	$\pm z$ $-3,72 < +0,22 > +5.00$	$-3,12 < +0,11 > +3,63$
Бортовая качка, °	$\pm\theta$ $-10^\circ 13 < +1^\circ 38 > +10^\circ 84$	$-5^\circ 28 < +1^\circ 53 > +4^\circ 81$
Килевая качка, °	$\pm\psi$ $-7^\circ 50 < +0^\circ 41 > +12^\circ 38$	$-5^\circ 78 < +0^\circ 25 > +8^\circ 79$
Ускорения по корме, м/с ²	$g \times (1 + \{ -0,91 \div +0,64 \})$	$1 + \{ -0,70 \div +0,56 \})$
Ускорения на миделе, м/с ²	$g \times (1 + \{ -0,27 \div +0,26 \})$	$1 + \{ -0,22 \div +0,22 \})$
Ускорения у штевней, м/с ²	$g \times (1 + \{ -0,56 \div +0,66 \})$	$1 + \{ -0,48 \div +0,54 \})$

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.

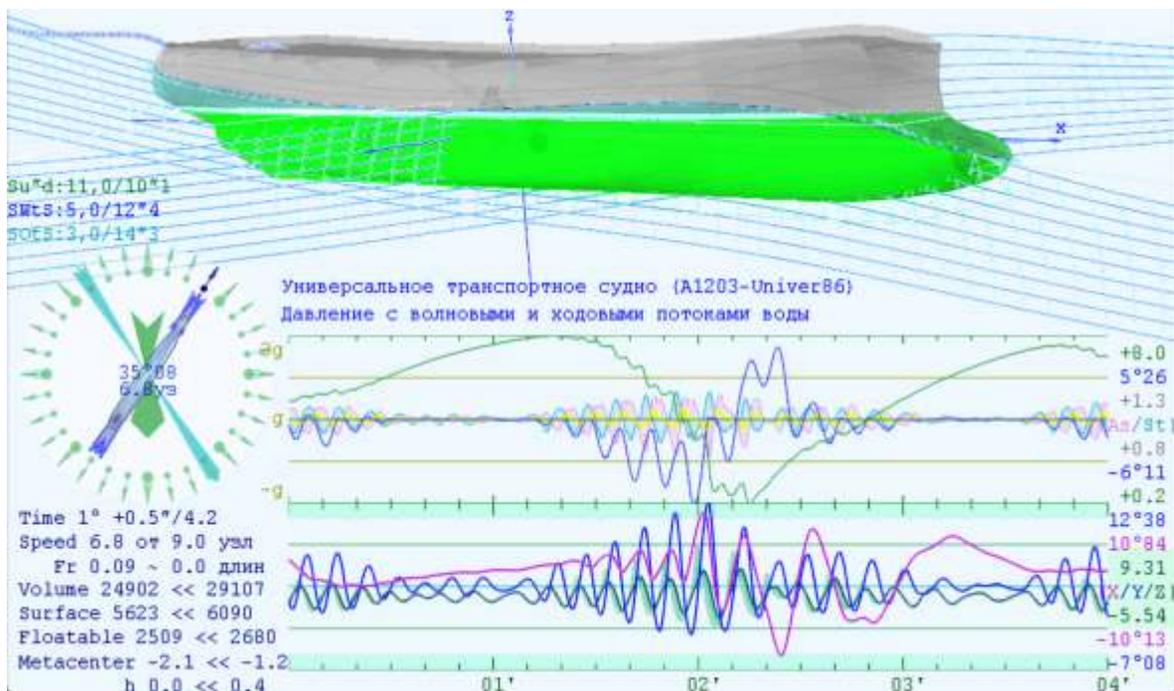


Рис. 90. Универсальное транспортное судно с умеренно сбалансированными моментами инерции площади действующей ватерлинии A-1203(Univer-86) вполне уверенно и без критических ситуаций движется в типичных штормовых условиях Тихого океана. При встрече с более чем $\zeta > 15$ -метровой волной судно заметно 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.

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 аперриодической и практически стихает, по килевой и вертикальной качке происходило естественное и вполне прогнозируемое отслеживание поверхности волновых склонов без видимых резонансных усилений.

По каждому штормовому вычислительному эксперименту транспортное судно Univer-86 в течение часа держало курс вразрез крупным гребням волн, уверенно подтверждая вполне приемлемую штормовую ходкость. Лишь изредка, при прохождении особо крупных волн (Рис. 90), 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 управляется 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 подсплывает вверх, как бы интегрируя динамический уровень штормового моря (что возможно свидетельствует о некорректности математической модели для представления кинематики подводных течений).

Сохранность незакрепленного 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 преодолен за счет утроения нагрузки под широкой консолью крейсерской кормы, по результатам экспериментов отмеряемых относительно ускорений в средней части корпуса.

Уместно отметить, что в мореходных испытаниях самоходная телеуправляемая модель транспортного судна Univer-86 на интенсивном волнении (Рис. 69) также показывала наилучшие мореходные качества как по ходкости, так и по плавности умеренной бортовой качки.

Буксир-спасатель – научно-исследовательское судно

Судно обеспечения морских экспедиций не проектируется специально для превосходной комфортности обитания экипажа. Профессиональным морякам важнее решать специальные задачи в любых навигационных и погодных условиях, с безусловным поддержанием палубных работ любой сложности с особыми механизмами и устройствами, в том числе для надежного всепогодного взаимодействия с кораблями экспедиции по их требованию, так же как и в случаях проведения аварийно-спасательных операций в обеспечение живучести подконтрольных судов или спасения их экипажей.

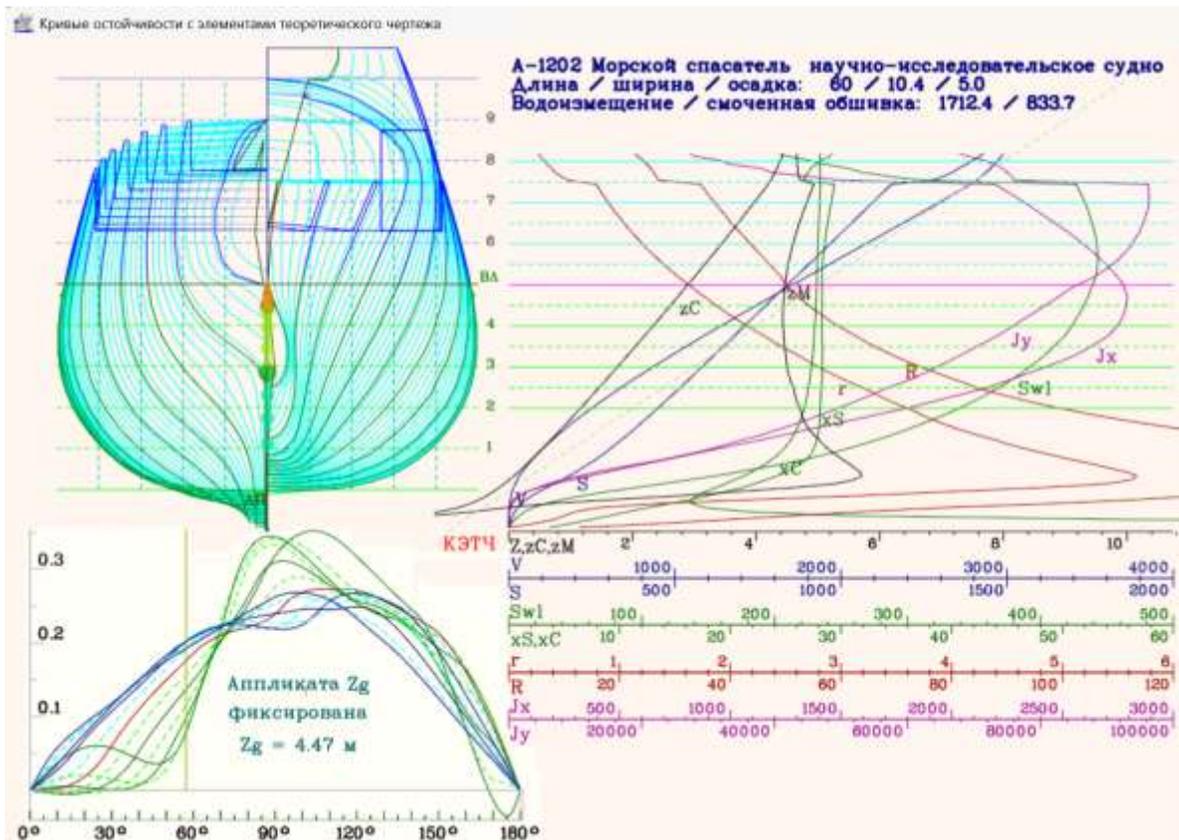


Рис. 91. Морской-спасатель – научно-исследовательское судно. А-1202.

Клиперский корпус буксира с округлыми очертаниями миделя (Рис. 91) позволяют спрогнозировать пассивность корабля к силовому

влиянию крупных штормовых волн, подобно «бревну». Небольшое бульбовое утяжеление форштевня со штормовым подрезом служат смещению центра бокового сопротивления в нос, улучшая управляемость и прогнозируемость динамического позиционирования буксира-спасателя при швартовках с другими кораблями на ходу в штормовом море.

Значительное смещение центра величины в корму с заглублением винто-рулевого комплекса служат как устойчивости работы главных машин, так и однозначной управляемости даже на курсах по крутой трохoidalной волне, под которой скорость попутного потока угасает в экспоненциальной зависимости и потому не может создать эффекта обратного действия пера руля.

Спасательное судно должно уверенно маневрировать в штормовых условиях и держать курс с минимальными дрейфовыми смещениями на крупной волне.



Рис. 92. А-1202 - Буксир-спасатель – научно-исследовательское судно. Испытание телеуправляемой модели в открытом море. Слева модель поднимается по склону набегающей волны, опасного отката с обратным движением не фиксируется. Справа, модель с округлыми обводами сопровождают несколько дельфинов с похожей формой тела.

В реальных морских испытаниях в Охотском море у острова Уруп, вблизи маяка Ван-Дер-Линда в видимости пролива Фриза, телеуправляемая модель буксира-спасателя А-1202 подтверждала превосходные море-

ходные качества и уверенное маневрирование на крутом волнении, с высотой волн соизмеримых с длиной опытовой модели. Фактически на любом курсе модель буксира поддерживает устойчивость на курсе и бесперебойный ход вперёд, с внешне естественным всхождением на крутые гребни обрушающихся волн, без экстремальной бортовой качки, без заныривания и без видимых ударов волн на палубам и надстройкам модели буксира – спасателя (НИС). На борту модели велась регистрация координат и скорости хода, килевой и бортовой качки, а также проводилось измерение глубины моря специально настроенным и установленным днищевую шахту рыболовным эхолотом.

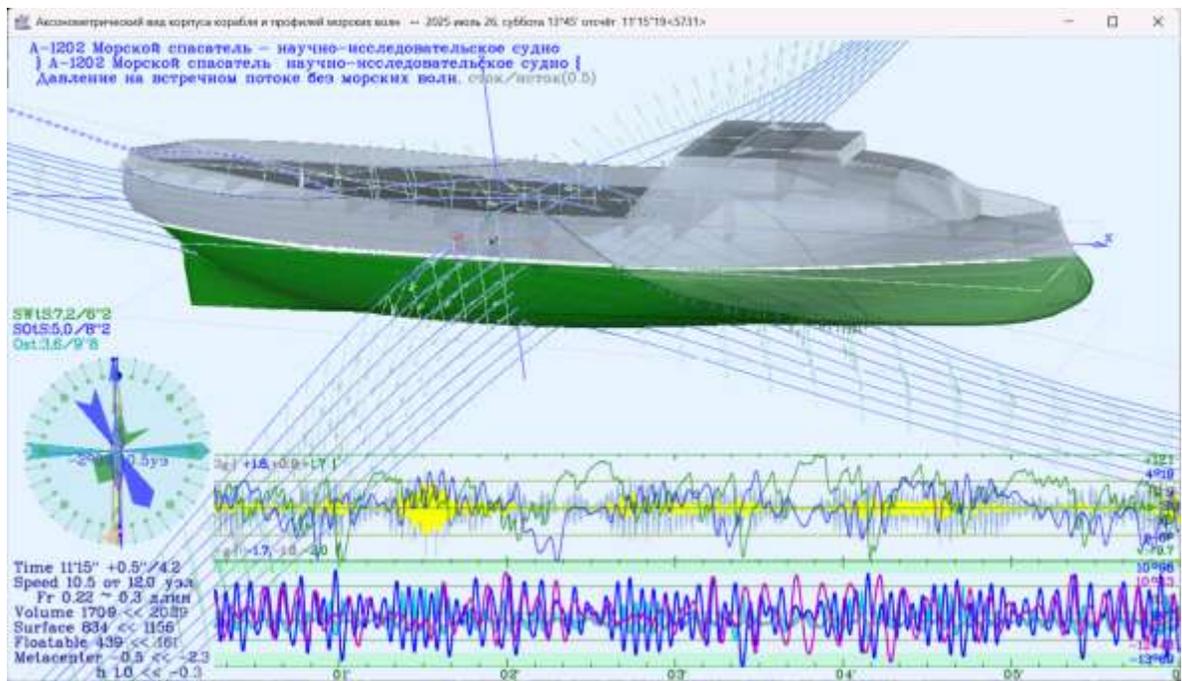


Рис. 93. А-1202 - Буксир-спасатель – научно-исследовательское судно.
Штормовой ход вразрез волне среди крупных стоячих волн.

Очень важно отметить, что предельно высокая и обрушающаяся штормовая волна, называемая девятым валом, в динамике должна представляться свойствами стоячей волной без быстрых горизонтальных потоков в гребнях волн. Среди таких отчасти стоячих волн судно может спокойно маневрировать, не подвергаясь опасностям вовлечения корпуса

в сильно закрученный скоростной поток под гребнями предельно высоких волн.

Первый эксперимент проведён в условиях стоячих волн, для чего в модели корабельной гидромеханики отключается силовое воздействие подводных скоростных потоков трохоидального волнения.

Вычислительный эксперимент строится по ранее настроенной схеме для предыдущих испытаний.

Волна: $\lambda = 60$ м, $\tau = 6.2$ " , $\zeta = 7.15$ м, $\alpha = 1.0$, $C = 9.7$ м/с, $A = 210^\circ$,

Зыбь: 105 м, 8.2", 5.01 м, 0.4, 12.8 м/с, 150°,

Вал: 150 м, 9.8", 3.58 м, 0.2, 15.3 м/с, 90°.

где суммарная высота гребня максимальной волны оценивается величиной 16 м. Ветровая волна устанавливается по длине корпуса с предельно крутизной гребня, под которым скорость потока воды превышает 18 узлов. Длительность опытовых испытаний в реальном времени составила 12 минут, при этом выполнено 6160 тактов во времени. Экстремальные и осредненные результаты обобщаются в завершение протокола эксперимента:

скорость хода	$\pm \xi$ [м/с]	8.95 < +11.41 > +12.18
рыскание на курсе	$\pm \chi$ [°]	4.19 < -0.07 > -6.00
вертикальная качка	$\pm \zeta$ [м]	-1.56 < -0.01 > +1.37
бортовая качка	$\pm \theta$ [°]	-12.43 < -0.20 > +11.41
килевая качка	$\pm \psi$ [°]	-13.69 < -0.44 > +10.98
ускорения по корме	{a/g}	-1.69 < -0.00 > +1.82
[м/с ² /g] на миделе	{m/g}	-0.99 < +0.00 > +0.92
— — у форштевня	{f/g}	-2.02 < +0.00 > +1.70

Так же как и в морских испытаниях наблюдается прекрасная устойчивость на курсе с рысканием порядка от $\chi = 4,2^\circ$ до $\chi = -6^\circ$ с интегральным дрейфом по курсу всего $-0,07^\circ$.

В табличке приводится вертикальная качка относительно мгновенных значений уровня моря в средней части корпуса буксира, и если по высотам волн регистрируются заданные $\int \approx \pm 3$ м, то отслеживание поверхности волны регистрируется всего лишь как $\zeta = -1,56$ м на всплытие и $\zeta = +1,37$ м на погружение под волну.

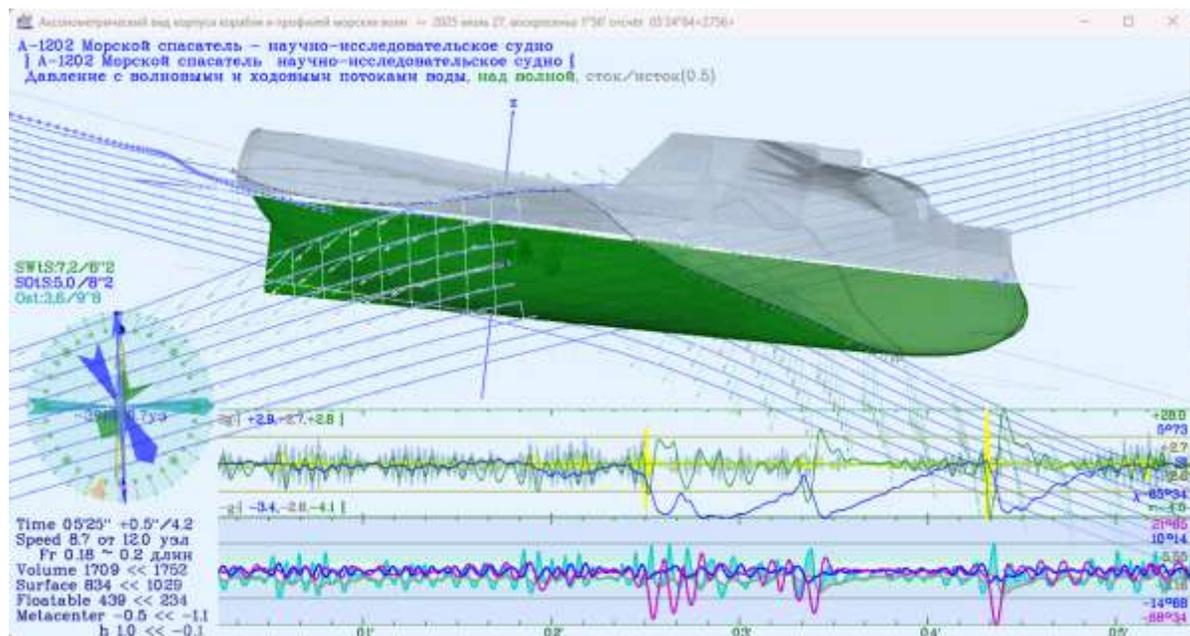


Рис. 94. А-1202 - Буксир-спасатель – научно-исследовательское судно. Значительное усиление опасности в случае прогрессивных волн.

Очень низкая высота верхней палубы, и особо заниженный бак, подвергаются заливаемости потоками воды из гребней волн, что служит существенно взаимокompенсации сил и моментов по килевой качке, но при этом по в оконечностях судна наблюдается ускорения вдвое выше ускорения свободного падения, с импульсами ускорений, которые следует определять как ударные, то есть на борту буксира будет ощущаться сильная вибрация под ударами падающих на палубу волн. В средней части корпуса вертикальные ускорения всё же чуть меньше ускорений в гребнях предельно высоких ветровых волн.

Как и ожидалось, что нередко проявляется в реальном плавании среднетоннажных судов, размах килевой качки превышает экстремумы по

крену, при этом бортовая качка иногда ослабевает при выходе из резонансов со штормовой волной, то килевая качка действует с максимальным размахом действует почти непрерывно – результат строгого отслеживания поверхности штормовых волн.

Скорость хода в условиях предельно интенсивных стоячих волн удерживается без особых потерь, с пульсациями скорости в пределах трёх узлов из двенадцати, задаваемых по тяге двигателей на тихой воде.

Условия плавания резко меняются в сторону повышенной опасности (Рис. 94) в случае аналогичных прогрессивных волн с той же предельно большой высотой. Такие волны всегда встречаются в форме одиночных кноидальных валов на мелководьях в открытом море, или на мелководья при подходах к берегу. В случае экспериментов с буксиром, моделируемая встреча с такой волной представляет реальную опасность брочинга, с быстрой постановкой судна лагом к волне, огромными накренениями и возможностью мгновенного опрокидывания, и других трудно предсказуемых явлений корабельной гидромеханики катастроф.

В частности, по графикам на отсчёте времени 2'32" отчетливо регистрируется превышение уровня моря над корпусом судна на величину порядка 5 метров, от чего возникает ударное ускорение, видимо при накате волн на плоскую палубу с окаймлением фальшбортами, и судно уваливается с курса на величину $\chi = 65^\circ$, становясь лагом к волне с креном порядка $\vartheta = 68^\circ$ на левый борт. Получается сценарий морской катастрофы, судну будет трудно вырваться из объёма волн и гидродинамических ударов без повреждений. Хотя, в случае с надстройкой, включаемой в контур запаса плавучести, судно восстанавливается и продолжает штормовой ход по заданному курсу с заданной скоростью до следующего удара менее чем через две минуты.

Третий эксперимент в тех же условиях жестокого волнения с прогрессивными волнами выполнялся в условиях активного маневрирования.

Крутые гребни девярых валов в открытом море имеют очень малую протяжённость, и потому судно может легко уклоняться от прямого столкновения с особо крупными волнами. При таком маневрировании обитаемость на борту судна может быть даже лучшей, чем произвольное движение среди девярых валов – стоячих волн. Однако в ночное время или в плохую видимость в непогоду такое активное штормовое маневрирование может быть крайне затруднительным.

Капитан обычно выбирает наиболее комфортный штормовой курс, устанавливая маршрут с попеременной лавировкой среди групповых структур штормового волнения. По крайней мере, вычислительный эксперимент подтверждает возможность значительного снижения килевой качки с уменьшением вертикальных ускорений на борту корабля в случае умелого управления ходом и курсом корабля. Иначе, простое удержание произвольного курса может означать «ход по кочкам», с очень резкой качкой на борту корабля.

Общее заключение

Прямые вычислительные эксперименты по моделированию штормового плавания конкретного корабля, с возможностью визуализации гидромеханики взаимодействия с одиночными гребнями или пакетами крупных волн в масштабе реального времени, служит опытовому обоснованию инженерных предпосылок в проектировании перспективных кораблей и судов повышенной штормовой мореходности, и весьма полезны в составе бортовых штурманских счетно-решающих устройств и экспертно-информационных систем в морских службах капитанов-наставников, для синтеза оперативных рекомендаций мореплавателям в штормовых условиях мореходства.

Вопросы корабельной гидромеханики, вычислительные эксперименты для прямого моделирования мореходности корабля в условиях штормового волнения, по мере апробирования в условиях реальной морской практики, в первую очередь должны востребоваться в обоснованиях наставлений мореплавателям для конкретных классов судов и навигационно-географических условий, в том числе в экстремальных или аварийных условиях плавания, и крайне необходимы для достижения реальной эффективности мореходства на каботажных коммуникациях и рыбных промыслах в штормовых акваториях Дальнего Востока России.

Экспериментальная вычислительная среда обладает полноценной трёхмерной визуализацией всех структур морского волнения, с траекторией перемещения и позиционирования модели корабля в охвате морских волн, с контролем гидродинамических центров и действующих метацентрических параметров мгновенной остойчивости. Стандартные графические средства OpenGL дают возможность настройки прозрачности морских волн с выбором вариантов сплошных или контурных прорисовок судовых обводов и надводной архитектуры корабля, что дает судоводителю

возможность наглядного анализа и заблаговременного прогноза условий и эффективности штормового хода, в том числе для предотвращения потенциально опасных или аварийных ситуаций в открытом штормовом море.

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

Новый инструментарий открывает актуальное направление исследований в области корабельной гидромеханики с невысокими требованиями по оперативной памяти и вычислительной производительности, с доступностью к использованию в производственных и конструкторских изысканиях; в исследовательских и академических целях.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ МОРСКИХ И КОРАБЕЛЬНЫХ ИЗЫСКАНИЙ

1. *Войткунский Ярослав Иосифович, Фадеев Юрий Иванович, Федяевский Константин Константинович.* Гидромеханика. Л. Судостроение, 1968. – 568 с.
2. *Крылов Алексей Николаевич.* Качка корабля. Собрание трудов, том XI. – М.Л.: Издательство Академии наук СССР, 1951, – 469 с.
3. *Павленко Георгий Евстафьевич.* Сопротивление воды движению судов. – М.: Водтрансиздат, 1953. – 507 с.
4. *Кильчевский Николай Александрович.* Элементы тензорного исчисления и его приложения в механике (*Физико-математическая библиотека инженера*). – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954, – 168 с.
5. *Кочин Николай Евграфович, Кибель Илья Афанасьевич, Розе Николай Владимирович.* Теоретическая гидромеханика. М.: Физматгиз, 1959, ч. I, 584 с., ч. II, 728 с.
6. *Семенов-Тянь-Шанский Владимир Вениаминович.* Статика и динамика корабля: Плавуемость, остойчивость и спуск на воду. Л.: Судостроение, 1973. – 607 с.
7. *Холодилин Александр Николаевич.* Стабилизация судна на волнении. Л.: Судостроение, 1972. 232 с.
8. *Шебалов Александр Николаевич.* Нелинейная теория волн и волнового сопротивления: Учебное пособие. – Л.: Изд. Ленинградского кораблестроительного института, 1984. 107 с.
9. *Ван-Ламмерен, Троост, Конинг.* Сопротивление, пропульсивные качества и управляемость судов. Л.: Судпромгиз, 1957. 388 с.
10. Справочник по теории корабля. Том 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители. / Под редакцией *Я. И. Войткунского.* – Л.: Судостроение, 1985. – 768 с., ил.; Том 2. Статика судов. Качка судов. – 440 с., ил.
11. *Томас С. Джилмер.* Проектирование современного корабля. – Л.: Судостроение, 1974. – 280 с., ил. (*Modern Ship Design, by Thomas Charles Gillmer, 1970*)
12. *Людвиг Прандтль.* Гидроаэромеханика. – М.: Издательство иностранной литературы, 1949.– 520 с. (*Führer durch die Strömungslehre. Von Dr. Ludwig Prandtl. 1944, Предисловие автора: Геттинген–1942*) – М.: 2002. – 572 с.

13. *Mr. Jonh Henry Michell* on the Wave–Resistance of a Ship. *Philosophical Magazine*, 1898, vol.45, Ser.5, pp.106–123. shipdesign.ru/JHM-rus.html
14. *Gerstner Franz Joseph*: 1802 “Theorie der Wellen,” *Böhmische Gesellschaft der Wissenschaften, Abhandlungen*; 1804 “Theorie der wellen samt einer daraus abgeleiteten Theorie der Deichprofile”. *Теория волн и основанная на ней теория волновых профилей* (Prague: Gottlieb Haase); sowie 1809 in *Annalen der Physik*, 32, 412-445.
15. *Arnold Sommerfeld*. *Mechanik der deformierbaren medien*. Leipzig.: Zweite, neuberbeitete Auflage. 1949. (*Арнольд Зоммерфельд*. *Механика деформируемых сред*. М.: Издательство иностранной литературы, 1954. 491 с.).
16. *Храмушин В. Н.* Трехмерная тензорная математика вычислительных экспериментов в гидромеханике. – Владивосток: ДВО РАН 2005. – 212с. shipdesign.ru/Khram/Tensor_Mathematics-2005.pdf
17. *Храмушин В. Н.* Поисковые исследования штормовой мореходности корабля. – Владивосток: Дальнаука, 2003. – 160 с.
18. *Храмушин В. Н.* Поисковые исследования штормовой мореходности корабля. *История эволюционного становления корабельного дела, о единении морских инженерных наук и хорошей морской практики*. Lambert Academic Publishing. 2018. – 470 с.
MoreBooks.de/shop-ui/shop/product/978-613-8-23643-6
ShipDesign.ru/Khram/History-III.pdf
19. *Храмушин В. Н.* Гидромеханика крыла и плавника. *Нестационарная гидромеханика движения крыльев и хвостового плавника рыбы*. Lambert Academic Publishing. 2023. – 80 с. MoreBooks.de/shop-ui/shop/product/978-620-7-44758-9, ShipDesign.ru/Khram/Wings.html
20. *Храмушин В. Н.* Динамика длинноволновых процессов на шельфе дальневосточных морей. *Гидродинамические вычислительные эксперименты: морские гидротехнические изыскания и прогноз опасных морских явлений*. Lambert Academic Publishing. 2023. – 300 с.
MoreBooks.de/shop-ui/shop/product/978-620-7-44839-5
ShipDesign.ru/Khram/Doctoral-thesis_Waves.pdf

Теоретические вопросы кораблестроения и гидромеханики

21. *Астарита Дж., Маруччи Дж.* Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей. М.: Мир, 1978. 312 с.
22. *Астахов А.В., Широков Ю.М.* Курс физики. Т. II. Электромагнитное поле. М.: Наука, 1980. 384 с.
23. *Белоцерковский О.М.* Численное моделирование в механике сплошных сред. М.: Наука, 1984. 520 с.

24. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. Вычислительный эксперимент. М.: Наука, 1982. 392 с.
25. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1973. 848 с.
26. Прандтль Л., Титъенс О. Гидро- и аэромеханика. Т. 1. Равновесие. Движение жидкостей без трения. М.Л.: Государственное технико-теоретическое издание, 1932. 222 с; Т. 2. Движение жидкостей с трением и технические приложения. М. Л.: Государственное технико-теоретическое издание, 1935. 312 с.
27. Филин А.П. Введение в строительную механику корабля. СПб: Судостроение, 1993. 640 с.

Вопросы проектирования и технической эксплуатации флота

28. Аносов А.В., Дидык А.Д. Управление судном и его техническая эксплуатация. М.: Морской транспорт, 1964. 465 с.
29. Артюшков Л.С. Расчеты сопротивления воды движению морских транспортных судов. Л.: ЛКИ, 1980. 88 с.
30. Артюшков Л.С. Расчеты сопротивления при движении судов в особых условиях. Л.: ЛКИ, 1983. 64 с.
31. Артюшков Л.С. Динамика неньютоновских жидкостей. СПб.: Изд. ГМТУ, 1997. 460 с
32. Ашик В.В. Проектирование судов. Л.: Судостроение, 1975. 352 с.
33. Благовещенский С.Н. Качка корабля. Л.: Судпромгиз, 1954. 520 с.
34. Благовещенский С.Н., Холодильник А.Н. Справочник по статике и динамике корабля. Л.: Судостроение, 1976. 312 с.
35. Бронштейн Д.Я. Устройство и основы теории судна. Л.: Судостроение, 1988. 336 с.
36. Войткунский Я.И. Сопротивление воды движению судов. Л.: Судостроение, 1964. 412 с.
37. Войткунский Я.И., Перишц Р.Я., Титов И.А. Справочник по теории корабля. Л.: Судпромгиз. 1973. 682 с.
38. Войткунский Я.И. Гидромеханика. Л.: Судостроение, 1982. 456 с.
39. Готман А.Ш. Волновое сопротивление и оптимизация обводов водоизмещающих судов. Новосибирск. Диссертация д.т.н. № Г/р 05.9.60 001867, 1996. 207 с., прил. 81 с.
40. Готман А.Ш. Определение волнового сопротивления и оптимизация обводов судов (Часть 1. Волновое сопротивление судов. Часть 2. Методы расчета волнового сопротивления. Оптимизация обводов корпуса водоизмещающих судов). Новосибирск: НГАВТ, 1995. 322с.
41. Готман А.Ш. Проектирование обводов судов с разворачивающейся обшивкой. Л.: Судостроение, 1979. 192 с.

42. *Ногид Л.М.* Остойчивость судна и его поведение на взволнованном море. Л.: Судостроение, 1967. 242 с.
43. *Ногид Л.М.* Проектирование морских судов. Л.: Судостроение, 1976. 208 с.
44. *Ньюмен Дж.* Морская гидродинамика. Л.: Судостроение, 1985. 368 с.
45. *Семенов-Тянь-Шанский В.В., Благовещенский С.Н., Холодильник А.Н.* Качка корабля. Л.: Судостроение, 1969. 392 с.
46. *Титов И.А., Егоров И.Т., Дробленков В.Ф.* Ходкость быстроходных судов. Л.: Судостроение, 1979. 256 с.
47. *Ханович Х.* Сопротивление воды движению судов. М.: Военное издание. МВС, 1946. 316 с.
48. *Храмушин В. Н.* Геометрическая интерпретация волнового сопротивления с целью проектирования формы корпуса судна (с.56–58); Историко-технический анализ мореходности и выработка эвристических правил проектирования формы корпуса судна (с.59–60) : X Дальневосточная научно-техническая конференция // Опыт проектирования и модернизации судов для дальневосточного бассейна. – Владивосток: ВНТО им. ак. А. Н. Крылова, 1989.
49. *Храмушин В.Н.*. Диссертация к.т.н.: «Оптимизация формы корпуса корабля» по специальности 05.08.03 – проектирование и конструкция судов, Владивосток: ДВГТУ, 2002 г.
50. *Шокальский Ю.М.* Океанография. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1959. 538 с.

Историческая

51. История отечественного судостроения. В пяти томах. Под редакцией акад. *И.Д. Спасского*. СПб: «Судостроение», 1994.
52. История штормовой мореходности (от древности до наших дней): по материалам поисковых и научно-исследовательских работ. Калининград, 1975–Владивосток–Санкт-Петербург–Сахалин, 2003 / *В.Н. Храмушин, С.В. Антоненко, А.А. Комарицын* и др. – Южно-Сахалинск : Сах. кн. изд-во, 2004. – 288 с., ил. + CD-ROM

«Контекстная графика» – (Window-Place) Контекстно-зависимая среда построения трехмерной графики OpenGL с использованием виртуальных процедур C++ и многооконного интерфейса Windows со стекowym наложением графических и текстовых фрагментов. Храмушин В. Н. СахГУ № 2010615850 от 8 сентября 2010 г. Заявка № 2010614191, дата поступления 13 июля 2010 г.

ShipDesign.ru/SoftWare/2010615850.html

«Н u l l» – Построение аналитической формы корпуса корабля, расчеты волнового сопротивления, кривых элементов теоретического чертежа и диаграмм остойчивости морских судов. Храмушин В. Н. СахГУ № 2010615849 от 8 сентября 2010 г. Заявка № 2010614190, дата поступления 13 июля 2010 г.

ShipDesign.ru/SoftWare/2010615849.html

«Тензор» - Программа для построения числовых объектов и функций трехмерной тензорной математики при реализации вычислительных экспериментов в гидромеханике Храмушин В. Н. СПбГУ № 2013619727 от 14 октября 2013 г. Заявка № 2013617542 от 20 августа 2013 г. ShipDesign.ru/SoftWare/2013619727.html

«Ядро» - Интерактивный графический программный комплекс для моделирования взаимодействия поляризованных корпускул в трехмерном пространстве. Богданов А. В., Храмушин В. Н. СПбГУ № 2013619726 от 14 октября 2013 г. Заявка № 2013617576 от 20 августа 2013 г. ShipDesign.ru/SoftWare/2013619726.html

«Волна» - Интерактивный графический программный комплекс для построения и визуального анализа штормовой поверхности моря. Дегтярев А. Б., Богданов А. В., Храмушин В. Н. СПбГУ № 2013619728 от 14 октября 2013 г. Заявка № 2013617543 от 20 августа 2013 г. ShipDesign.ru/SoftWare/2013619728.html

«SpectrM» - Программа интерактивной графической визуализации спектральных зависимостей для парных и распределенных по морским акваториям временных рядов. Дегтярев А. Б., Храмушин В. Н. СПбГУ № 2015618259 от 4 августа 2015 г. Заявка № 2015614809 от 5 июня 2015 г.

ShipDesign.ru/SoftWare/2015618259.html

«Vessel» - БД Цифровые теоретические чертежи для проектного анализа гидростатических характеристик, остойчивости и ходкости корабля. Богданов А. В., Храмушин В. Н.

СПбГУ № 2015621368 от 8 сентября 2015 г., Заявка № 2015620664 от 5 июня 2015 г. ShipDesign.ru/SoftWare/2015621368.html

[«Ani»](#) – Прямые вычислительные эксперименты для моделирования цунами, штормовых нагонов, экстремальных течений и приливного режима в открытом океане и вблизи побережья. Храмушин В.Н. СахГУ № 2010615848 от 2010-09-08.

Shipdesign.ru/SoftWare/2010615848.html

[«Mario»](#) – Интерактивный океанографический программный комплекс для ведения и анализа цифровых приливных архивов и мореографных записей колебаний уровня моря. Храмушин В.Н. СахГУ № 2010615847 от 2010-09-08.

Shipdesign.ru/SoftWare/2010615847.html

[«Sakhalin»](#) – Информационно-картографическая система. Храмушин В.Н. СахГУ № 2010615845 от 2010-09-08.

Shipdesign.ru/SoftWare/2010615845.html

[«Батиметрия»](#) – база данных: Цифровые батиметрические массивы (Охотское море). Храмушин В.Н., Минервин И.Г. СахГУ №2010620626 от 2010.10.22.

Shipdesign.ru/SoftWare/2010620626.html

[«Сахалин - море»](#) – база данных: Расчетные и регистрируемые колебания уровня моря на Дальнем Востоке России. Храмушин В.Н., Шевченко Г.В., Симаков Е.Е. СахГУ № 2012620509 от 2012-06-05.

Shipdesign.ru/SoftWare/2012620509.html

Патенты и заявки на изобретения

[«Корабль без килевой качки на ходу на волнении»](#). Храмушин В. Н.

Рег. № 2007133625 от 07.09.2007 г., вх.№ 036722. Бюл. № 8 от 20.03.2009 г. ShipDesign.ru/Invent/02.html

[«Корабль гидрографической и патрульной службы»](#). Храмушин В. Н. Патент

№ 2384456 от 20 марта 2010 г. Бюл. № 8. Рег.№ 2008117748, от 4.05.2008 г., вх.№ 020436. (решение о выдаче патента от 2009-07-21)

ShipDesign.ru/Invent/05.html

[«Корабль без бортовой качки на волнении»](#). Храмушин В. Н. Патент

№ 2360827 от 10.07.2009 г. Бюл. № 19. Рег.№ 2007133623, от 07.09.2007 г., вх.№ 036720. ShipDesign.ru/Invent/01.html

[«Корабль с плавниковым двигателем»](#). Храмушин В. Н. Патент

№ 2360831 от 10.07.2009 г. Бюл. № 19. Рег.№ 2007133624, от 07.09.2007 г., вх. № 036721. ShipDesign.ru/Invent/03.html

[«Активный стабилизатор килевой и бортовой качки корабля – штормовой аварийный движитель»](#). Храмушин В. Н. Патент

№ 2384457 от 20.03.2010 г. Бюл. № 8. Рег. № 2008116649, от 24.04.2008 г., вх. № 018958. (решение о выдаче патента от 2009-10-01)

ShipDesign.ru/Invent/04.html

- «[Корабль, устойчивый в штормовом плавании](#)». Храмушин В. Н. Патент № 2487043 (СахГУ). Бюл. № 2. от 20 января 2013 г. Рег.№ 2011129192, от 12.07.2011 г. (составлено 2011-01-17, решение о выдаче патента от 2012-11-01) [ShipDesign.ru/Invent/06.html](#)
- «[Рыболовное судно северных морей](#)». Храмушин В. Н. Патент № 2535382 (СахГУ). Бюл. № 34. от 10 декабря 2014 г. Рег.№ 2012145301, от 24.10.2012 г. вх.№ 072860. (составлено 2012-05-27) [ShipDesign.ru/Invent/07.html](#)
- «[Носовая оконечность быстроходного надводного корабля или относительно тихоходного гражданского судна повышенной штормовой мореходности и ледовой проходимости в автономном плавании](#)» - Форштевень и скула корабля (Stem). Храмушин В. Н. Патент № 2607136, Бюл.№ 1 от 2017-01-10. Рег.№ 2015107067/20(011473), от 2015-03-02. (составлено 2015-01-12, решение о выдаче патента 2016-07-27) [ShipDesign.ru/Invent/08.html](#)
- «[Кормовая оконечность стабилизированного для штормового плавания корабля](#)» - Ахтерштевень и кормовой подзор корабля (Stern). Храмушин В. Н. Патент № 2607135, Бюл.№ 1 от 2017-01-10. Рег.№ 2015107068/20(011474), от 2015-03-02. (составлено 2015-01-12, решение о выдаче патента 2016-07-27) [ShipDesign.ru/Invent/09.html](#)
- «[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](#)
- «[Морской спасатель - научно-исследовательское судно](#)» (A1202). Храмушин В. Н. Патент № 2603818 (СахГУ). Рег.№ 2015126828/11 (041748) от 2015-07-03. (составлено 2015-03-26, решение о выдаче патента 2016-07-04) [ShipDesign.ru/Invent/11.html](#)
- «[Каботажное пассажирское судно](#)» (A1205). Храмушин В. Н. Патент № 2653906, бюл. № 14 от 2018-05-15. Рег.№ 2016150049 от 2016-12-19, вх.№ 080348 (составлено 2016-12-02). Решение о выдаче патента от 2018-01-15 [ShipDesign.ru/Invent/12-Coaster.html](#)
- «[Надводный борт и верхняя палуба корабля](#)» (Deck). Храмушин В. Н. Заявка: № 2016150045 от 2016-12-19, вх.№ 080344, публ.бюл.№17 от 2018-06-20 (составлено 2016-12-01). [ShipDesign.ru/Invent/13-Ship_Deck.html](#)

- [«Гидродинамическая модель источника штормовых нагонов и экстремальных течений под воздействием подвижного атмосферного тайфуна»](#). Храмушин В. Н. Патент № 2652642, бюл. № 13 от 2018-04-28. Рег.№ 2016150042 от 2016-12-19, вх.№ 080340 (составлено 2016-11-18). Решение о выдаче патента от 2018-01-18.
ShipDesign.ru/Invent/14.html
- [«Гидродинамическая модель очага цунами»](#). Храмушин В. Н. Патент № 2652643, бюл. № 13 от 2018-04-28. Рег.№ 2016150038 от 2016-12-19, вх.№ 080336 (составлено 2016-11-16). Решение о выдаче патента от 2018-01-17. ShipDesign.ru/Invent/15.html
- [«Жесткое машущее крыло без индуктивного вихреобразования, с реактивным сглаживанием спутных вихревых потоков – маршевый движитель корабля»](#) (жесткое машущее крыло в профилированном коробе-насадке) [[Судовой движитель](#)]. Храмушин В. Н., Ганкевич И. Г. Патент № 2745044, бюл. № 8 от 2021-03-18
ShipDesign.ru/Khram/Wings.html#_12
- [«Гибкое крыло с локальным приводом у борта корабля, плавниковый движитель – активный скуловой стабилизатор»](#) (гибкий плавник) [[Активный скуловой стабилизатор качки судна](#)]. Храмушин В. Н., Богданов А. В., Дегтярев А. Б Патент № 2749820, бюл. № 17 от 2021-06-17
ShipDesign.ru/Khram/Wings.html#_20

Полезные модели

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

Авторское наследие настоящих корабельных изысканий

Проведенные изыскания выполнены в дискуссиях и при поддержке авторитетных наставников Российских морских научных школ, с великой благодарностью должно вспомнить об этом в заключение:

*Судоводительское отделение Калининградского мореходного училища
министерства Рыбного хозяйства СССР;*

Специальное экспериментально-конструкторское бюро подводных исследований, Азчеррыба, Камышовая бухта, г. Севастополь;

Кафедры гидромеханики и теории корабля Кораблестроительного факультета Ленинградского кораблестроительного института;

Тихоокеанское управление промысловой разведки и научно-исследовательского флота, ТУРНИФ, Дальрыба, г. Владивосток;

Кафедра теории и проектирования корабля, факультет Кораблестроения, Дальневосточный государственный технический университет;

Сахалинский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, СахНИРО, Дальрыба, г. Южно-Сахалинск;

Лаборатория вычислительной гидромеханики и океанографии, СКБ средств автоматизации морских исследований ДВО РАН;

Докторантура по кафедре проектирования судов, Кораблестроительного факультета Санкт-Петербургского государственного морского университета;

Подсекция мореходных качеств судов в штормовых условиях, Российского Научно-технического общества судостроителей имени Алексея Николаевича Крылова;

Лаборатория вычислительной гидромеханики и морских исследований и кафедра математики Естественнонаучного факультета Сахалинского государственного университета;

Кафедра компьютерного моделирования и многопроцессорных систем, факультета Прикладной математики – процессов управления, Санкт-Петербургского государственного университета;

Архив исполняемых модулей программ и цифровые теоретические чертежи доступны в интернет по адресу:

ShipDesign.ru/SoftWare/Ship.z,

расширенный архив совместно с Free!ship:

ShipDesign.ru/SoftWare/Aurora.z,

руководство к программам Aurora и Hull: ShipDesign.ru/SoftWare/Vessel-action.pdf,

тексты программ и помощь в освоении: GitVerse.ru/Khram/Aurora и Khram@mail.ru

++ ([GitHub.com/Khram-V/Vessel](https://github.com/Khram-V/Vessel)).

~ ©2025-08-04 ~ Кашир+Сызрань-Калининград-Севастополь-Ленинград-Владивосток-Сахалин-Петергоф-ירושלים

