

Штормовая мореходность корабля (вычислительный эксперимент)

236039 Калининград, Калининградское мореходное училище, Судоводительское отделение.
190121 Ленинград, Ленинградский кораблестроительный институт, Кораблестроительный факультет, кафедра гидромеханики.
690095 Владивосток, Дальневосточный государственный технический университет, кафедра теории и проектирования корабля.
693008 Южно-Сахалинск, Сахалинский государственный университет, лаборатория вычислительной гидромеханики и морских исследований.
191186 Санкт-Петербург, Российское научно-техническое общество судостроителей им. Алексея Николаевича Крылова. Невский проспект, 44
198504 Старый Петергоф, Санкт-Петербургский государственный университет, факультет Прикладной математики – процессов управления,
кафедра компьютерного моделирования и многопроцессорных систем, Университетский проспект, 35

*Руководства: «Hull» – гидростатика, остойчивость и ходкость корабля,
и «Aurora» – вычислительный эксперимент в практике штормового мореходства*

Объединенный комплекс математических моделей и вычислительных алгоритмов по теории корабля «Hull» и мореходный вычислительный эксперимент «Aurora»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 опытной 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. Интерактивная 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.

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 в настоящей постановке проблемы означает опытные испытания «ближе опасности».

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

¹ © 1975 СВО КМУ ÷ 2012 КММС ПМ-ПУ СПбГУ ÷ 2025 יראשׁלִים.

Содержание

<i>Руководства: «Hull» – гидростатика, остойчивость и ходкость корабля, и «Aurora» – вычислительный эксперимент в практике штормового мореходства</i>	1
I. «Hull» – обводы корпуса, теория корабля и корабельное волнообразование.....	3
<i>Модель цифровых теоретических чертежей – таблицы плазовых ординат и штевней корабля в комплексе «Vessel»</i>	5
<i>Графическая визуализация корабельных обводов и доступ к подборке вычислительных процедур.....</i>	7
<i>Простые математические модели формы корпуса с возможностью аффинной и скуловой трансформации.....</i>	8
<i>Аналитические обводы для отработки ключевых характеристик формы корпуса корабля</i>	11
“Параболические” (степенные) обводы	11
Асимметричный относительно мидельшпангоута корпус	12
Штевни.....	14
<i>Кривые элементов теоретического чертежса и диаграммы остойчивости в диапазонах осадок интенсивной вертикальной качки.....</i>	15
<i>Основные гидростатические интегралы и соотношения.....</i>	17
<i>Интенсивность корабельного волнообразования в расчётах волнового сопротивления движению корабля</i>	19
II. «Aurora» – вычислительный эксперимент или опыты штормового маневрирования.....	27
<i>Краткое представление математических моделей и алгоритмов</i>	27
1. <i>Информационная консоль и графические окна визуализации мореходности корабля в штормовом море, интерактивное управление вычислительным экспериментом</i>	31
Общий графический интерфейс морского вычислительного эксперимента	34
Гидромеханика корабля: выбор и включение в эксперимент математических и алгоритмических моделей	35
Интерактивное управление ходом и курсом корабля.....	36
Сохранение цифровых моделей корабля в инородных форматах.....	37
2. <i>«Аксонометрический вид корабля и профилей морских волн»</i>	39
Гидростатические и метацентрические возврения в динамике корабля	44
3. <i>«Корабль и трохоидальные штормовые структуры морских волн»</i>	46
Предустановка условий опытных испытаний штормовой мореходности	47
Результаты опытных мореходных экспериментов.....	55
<i>Использованные источники морских и корабельных изысканий</i>	58
<i>Программные комплексы и базы данных</i>	59
<i>Патенты и заявки на изобретения.....</i>	60
<i>Авторское наследие настоящих корабельных изысканий.....</i>	61

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 [5].

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 опытных бассейнах и мореходных испытаниях в открытом море. Сбережение преемственности в эволюционном обновлении корабельного и морского инструментария отвечает поиску эффективных инженерных решений в проектировании корабля, и последующей проработке ключевых наставлений мореплавателям в согласии с хорошей морской практикой.

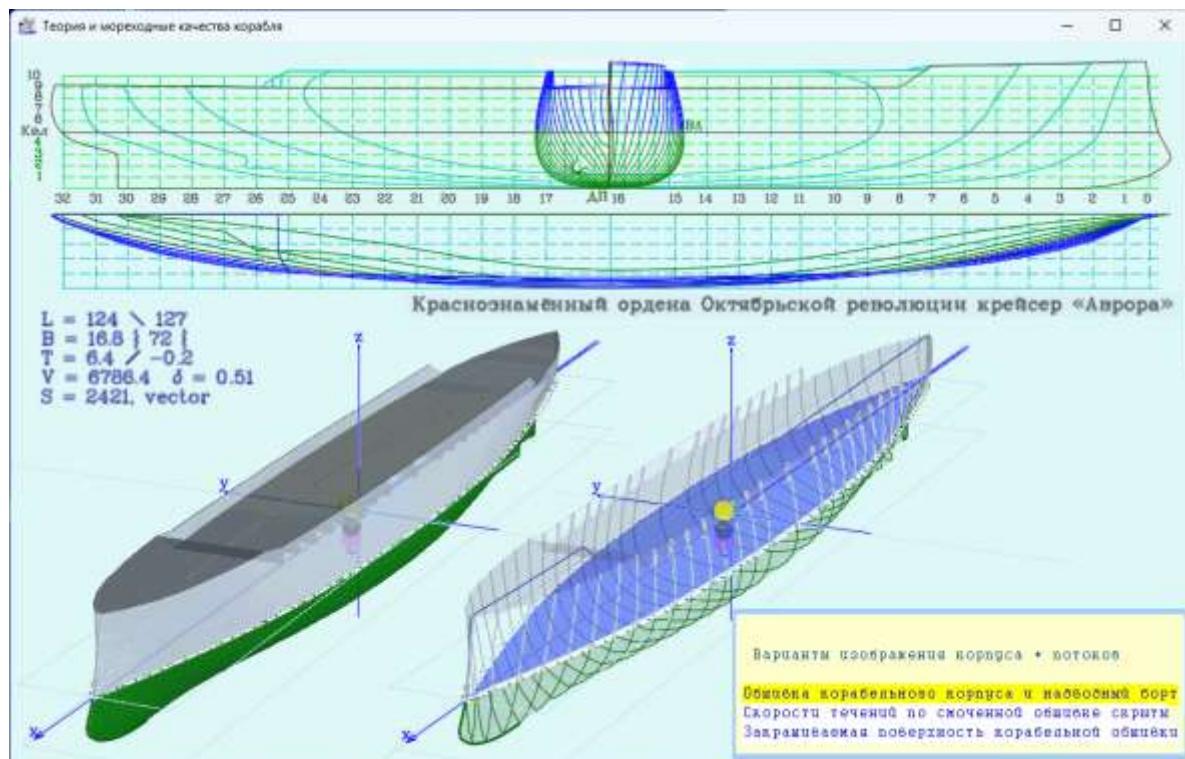


Рис. 1. Прорисовки по цифровой модели крейсера «Аврора», выполненные с помощью чистовых последовательностей для шпангоутов и штевней. Отсчёты абсцисс ведутся от кормы в нос, шпангоуты размечаются от носового перпендикуляра в корму. Симметричный относительно диаметральной плоскости корпус имеет положительные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

Принятое числовое представление теоретических чертежей корпуса корабля в форме таблиц плавовых 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 «Aurora» [часть.2], реализующих интерактивное управление кораблём в штормовом плавании, с возможностью визуального контроля и воздействия на состояние корабля и штормового моря.

Регуляризованные последовательности шпаций и точек в контурах шпангоутов, дополненные в диаметральной плоскости очертанием штевней 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 размечиваются 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 штевней 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 опытное 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 [5] (историческими) методиками. База данных «Vessel» также включает иные цифровые форматы описания корпуса корабля, которые по необходимости конвертируются 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 опытных 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 [13], 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 штурмовому маневрированию.

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

// Строчки комментариев с технической информацией по кораблю (// или ;)	
1.	Признак формата ($\blacktriangle=0x1E_{(alt+30)}$ и <название проекта> 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
	{x} – абсциссы местоположения шпангоутов (от кормы в нос)
	6. n x { z y... } – плазовые таблицы формируются контурами кривых с аппликатами и ординатами точек на шпангоутах с отсчётом от основной линии корпуса. Совпадение точек отмечает линии сломов борта.
	7+N n { z y... } – ординаты утолщения форштевня и бульба
	8.+N n { z x... } – абсциссы контура форштевня
~ Характеристики корпуса: (в 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 управляетя специальной программой «Hull», и по необходимости дополняется файлами конфигурации–протоколами <имя>.v1l для проведения прямых вычислительных экспериментов по моделированию штурмового маневрирования корабля с использованием комплекса «Aurora». Система в целом: («Hull»+«Aurora») – предназначается академическим исследованиям и оценочным изысканиям на этапах проектирования новых кораблей и судов повышенной штурмовой мореходности, и будет весьма полезна судоводителям для отработки вариантов штурмового 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 штурмового маневрирования корабля, при этом явно не востребуются суперкомпьютерные ресурсы для построения и реализации таких опытных 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 лодкой².

При включении цифровой модели корпуса «*.vs1» 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 функциями ординат по аппликатам шпангоутных контуров, возникающих в тоннельных обводах, на бортовых килях и других выступающих частях на смоченной обшивке корпуса. В программном комплек-

² автоматическое управление глубиной хода в июле 2025 в разработке.

се «Hull» такие вычисления ведутся с погрешностями от простого отсечения повторных пересечений ватерлиний при последовательном считывании шпангоутных контуров от киля 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 плавовых 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 геометрические построения для всех гидростатических и гидродинамических вычислений, в том числе для многокорпусных проектов судов, с обеспечением адекватного моделирования движения корабля во взаимодействии с *ураганным ветром*³ 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 директории будет записан, и сразу же считан файл-образец⁴ «Hull.vsl» с изначальной цифровой моделью [Hull, 2010] корпуса МИДВ⁵-1985.

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

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

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

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.

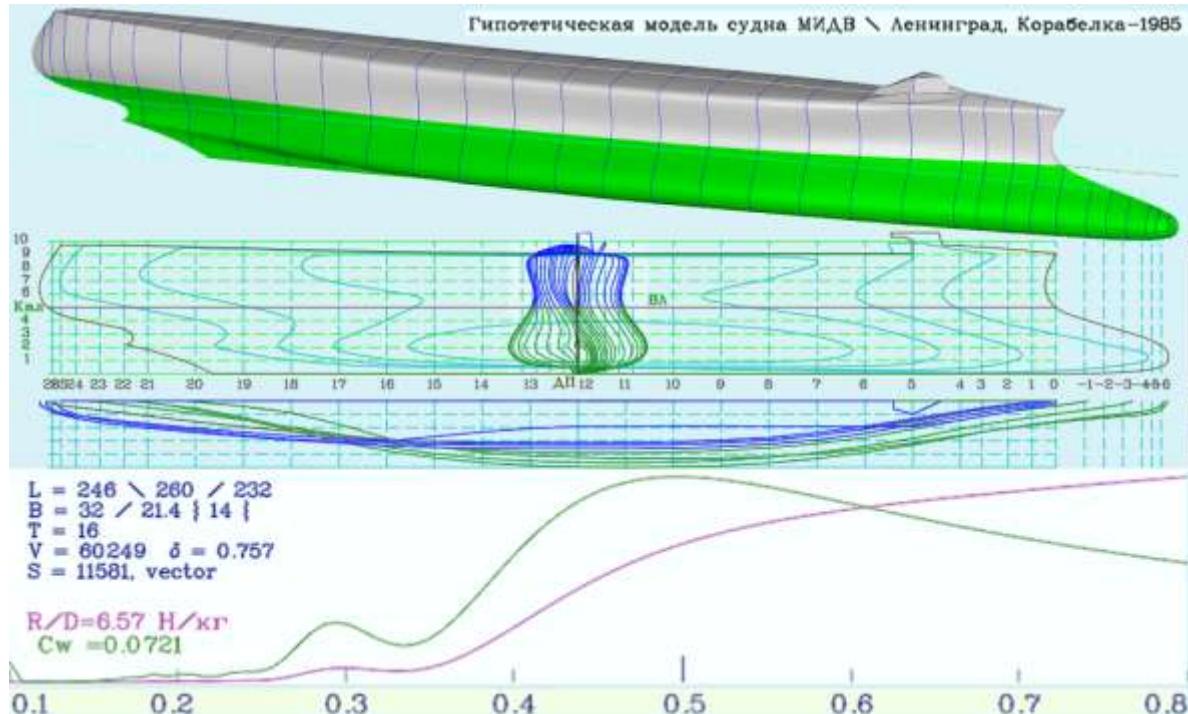


Рис. 3. Экспериментальная модель корпуса гипотетического корабля с уменьшенными моментами инерции площади действующей ватерлинии (МИДВ), и со смещенным в нос центром величины подводного объема. В 1985 г. модель участвовала в мореходных испытаниях в опытном бассейне кафедры теории корабля Ленинградского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

Перемасштабирование чертежей: <Ввод> – выполняется в пропорциях исходного масштаба с сохранением ширины активного 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 склонной 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 – полиноминальных** и **2 – экспоненциально-тригонометрических** функций. Эти весьма сложные геометрические модели рассматриваются в следующем параграфе.

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.

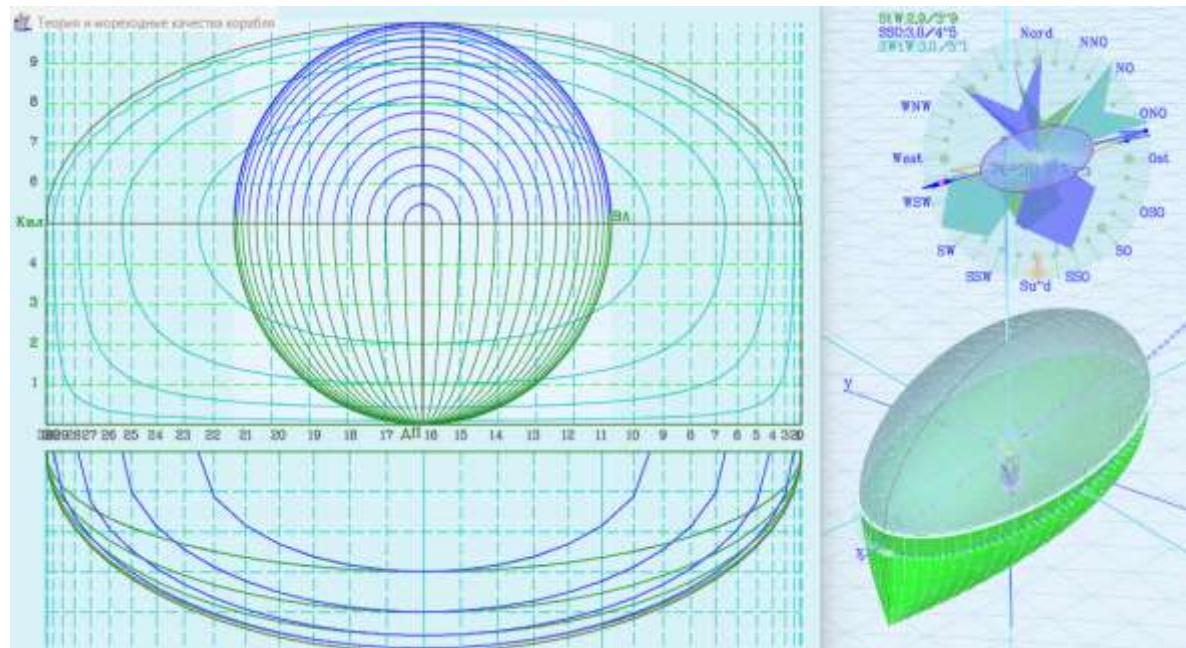


Рис. 4. «Шлюпка» – Модель на базе эллипсоида с равноудалёнными подводными ватерлиниями. Чисто эллиптическая форма надводной части корпуса предполагает её минимальное влияние при испытаниях на интенсивном штормовом волнении. Справа вверху показана картина вычислительного эксперимента с изображением кренометра 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 картины.

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 интерва-

Аналитические обводы корпуса

1 – на степенных функциях

2 – синусно-показательных

<<Простые преобразования>>

$x \cdot 1.000$ $y \cdot 1.000$ $z \cdot 1.000$

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

ла 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 равноудаленными 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 устанавливаться в половину ширины корпуса $T = B/2$, но это можно затем перенастроить с помощью аффинных преобразований.

Простейшие полиноминальные 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 негожим по ходкости и качке на волнении.

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

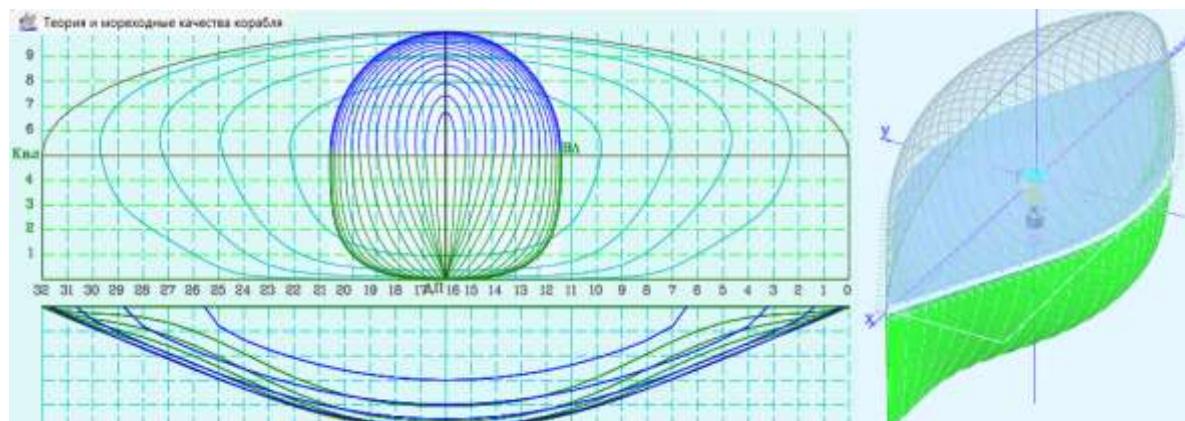


Рис. 5. Вариант «Корпуса» с однократным улучшением скуловых обводов по алгоритму: «обводы скуловых волн» для всей высоты борта со степенью полинома = 3.

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.

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».

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.

“Парabolicкие” (степенные) обводы

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 $Pz = 6.0$
Ватерлинии $Px = 3.0$
Заострение $Cx = 0.50 \in [0 \div 1]$
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.

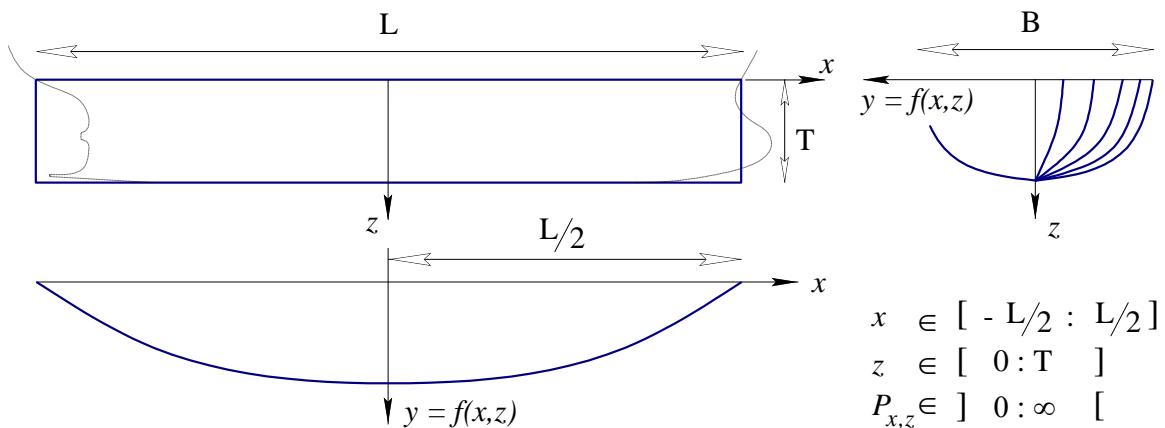


Рис. 6. Область определения и размерения аналитической модели симметричного относительно мидельшпангоута корпуса корабля – КПО - корпус параболических обводов.

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 ватерлиний и завала/развала бортов).

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

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

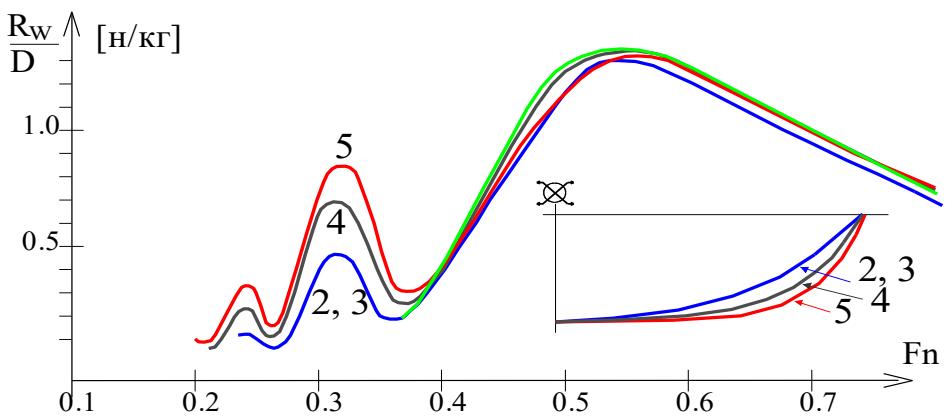


Рис. 7. Расчетные кривые удельного волнового сопротивления, отнесенного к водоизмещению для симметричного относительно мидельшпангоута параболического корпуса

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

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 сколовых 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 .

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

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

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

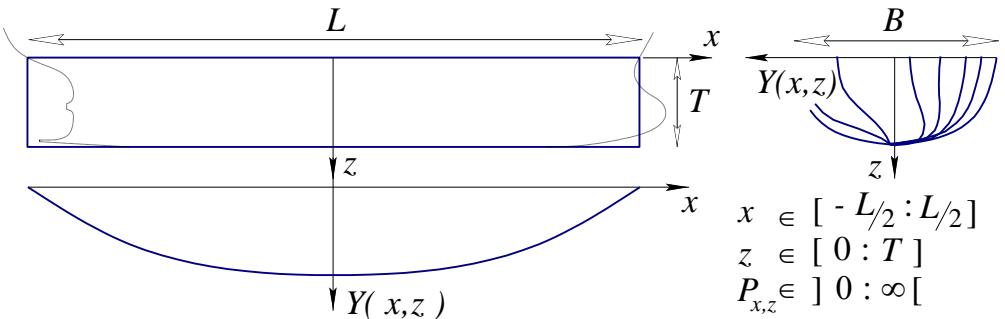


Рис. 8. Система координат и линии чертежа асимметричного корпуса

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 $P \leq 0.5$.

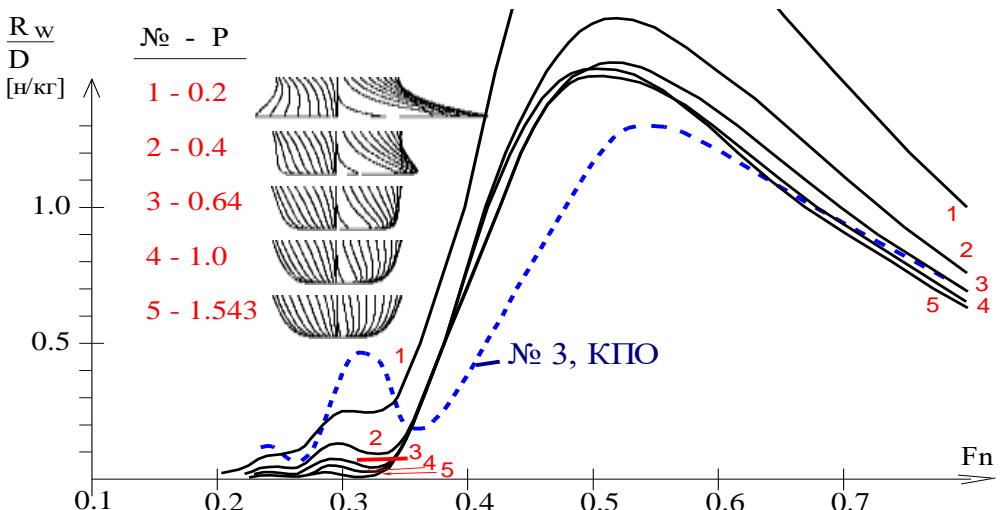


Рис. 9. Расчетные кривые удельного волнового сопротивления для несимметричного корпуса с экспоненциально-тригонометрическими обводами. Синим пунктиром показан расчет для корпуса с параболическими обводами, отмеченной под № 3 в предыдущей серии.

Из анализа графиков удельного волнового сопротивления (отношения волнового сопротивления к водоизмещению, Рис. 9) следуют выводы:

1. Применение носового бульба отчасти влияет на удельное волновое сопротивление на скорости хода порядка $F_n \approx 0.3$. При этом большая полнота действующей ватерлинии не приводит к значительному увеличению сопротивления, которое наблюдалось у корпуксов 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 корпуксов 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.

Условно оптимальным по минимуму волнообразования на скорости хода $F_n = 0.5$ 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;

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:

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 $L_a [0 \div 0.5] = 0.15$

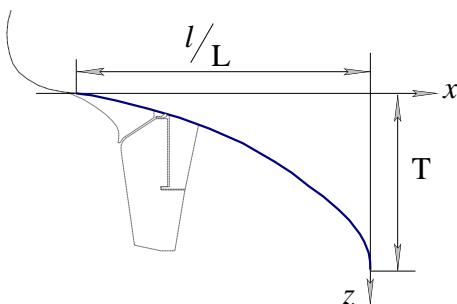
Крутизна подзора $N_a [1 \div \approx 2] = 1.60$

Длина корпуса Length= 123.74

Ширина Breadth= 16.80

Осадка Draught= 6.40

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



Rис. 10 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.

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

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.

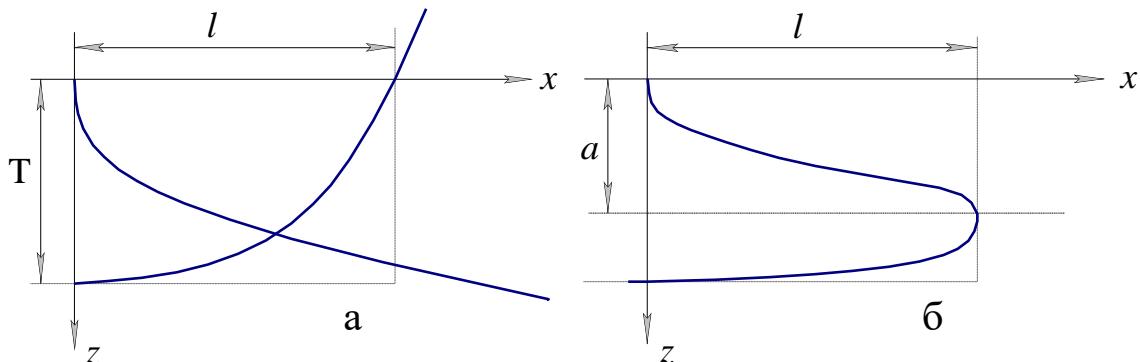


Рис. 11. Функции, образующие форштевень (а), и их произведение (б).

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

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

Расчёты гидростатики и остойчивости выполняются в программе «Hull» по традиционным [5] руководствам из учебника теории корабля, что необходимо для корректного сопоставления новых результатов с привычной или общепринятой корабельной документацией.

Процедура **<F5>** для расчётов гидростатики и остойчивости открывается в новом окне «Ship Hull Hydrostatics», где слева-вверху изображается проекция «корпус» теоретического чертежа (Рис. 12) 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 параметри-

Stability Гидростатика и остойчивость классика Семёнова Тянь-Шанского.

F1 эта краткая справка

F4 параметры диаграмм остойчивости

<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 метацентра

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

Jx, Ju поперечный и продольный моменты инерции площади ватерлиний

ческими построениями шпангоутов и штевней. При указанной инженерной преемственности в программе «Hull» выполняется отбор наибольших ординат при очерчивании шпангоутных контуров в функции аппликаты от киля к палубам, 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.

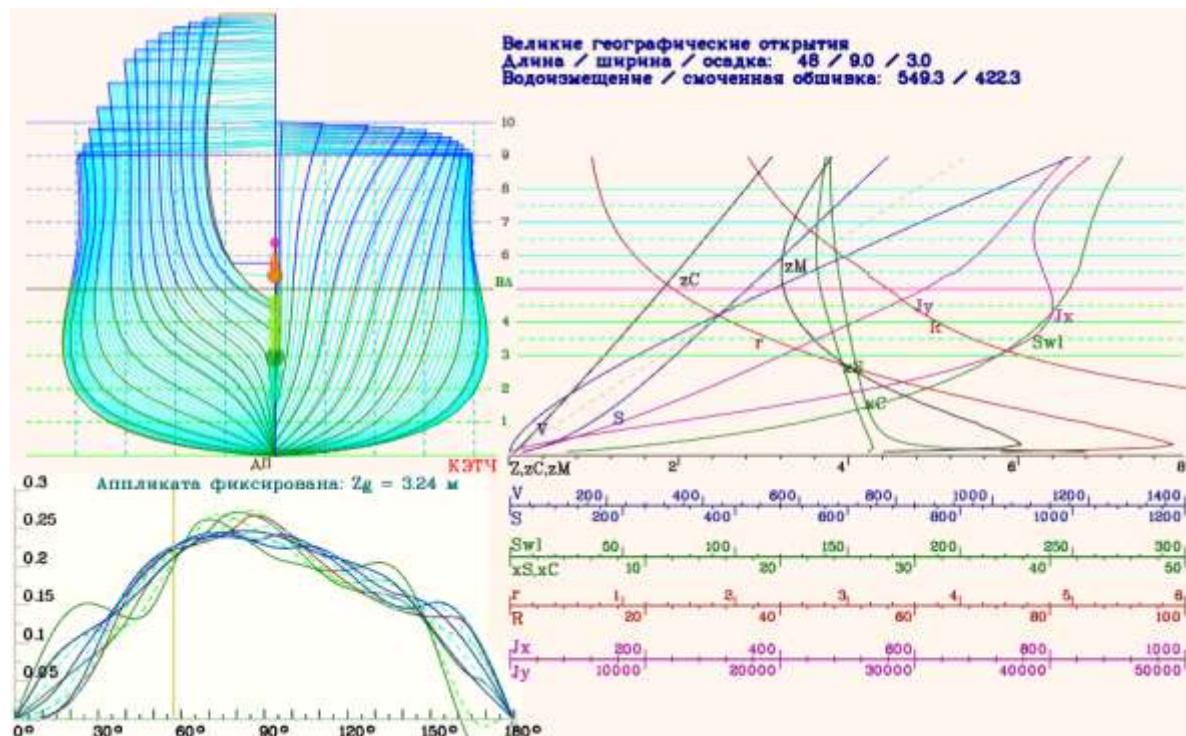


Рис. 12. Корпус галеона из эпохи Великих географических открытий обладает удивительной остойчивостью, всегда положительной при изменении посадки в условиях вертикальной качки, и без углов заката диаграмм даже при нулевой начальной метацентрической высоте.

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 корпуса изображается левее гидростатических кривых в том же вертикальном масштабе (Рис. 12) с общими горизонтальными ватерлиниями. Между исходными шпангоутами светло-голубыми ветвями прорисовываются переинтерполированные контуры, участвующие в расчётах, и по которым можно визуально оценивать корректность применения в расчетах обычных таблиц плазовых ординат.

На проекции корпус (Рис. 12 – 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. 12 – гидростатические кривые), где приводятся основные и промежуточные горизонтали 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 – метацентрическая 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 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.

Диаграмма Рида

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

Основные гидростатические интегралы и соотношения

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. 12). По этим же горизонталиям 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;

zC, zM [м] – аппликаты центра величины и метацентра;

V [м³] – грузовой размер, водоизмещение погруженного в воду части корпуса;

S [м²] – смоченная поверхность бортовой обшивки;

Swl [м²] – площадь действующей ватерлинии;

xS, xC [м] – абсциссы центра площади ватерлинии и величины корпуса;

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

Jx, Jy [м⁴] – 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 с излишними данными или погрешностями в оцифровке геометрии корпуса корабля.

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.

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 расчетной 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. Элементарная синусоида по разности аппликат для центра тяжести с центром объёма эллипсоида в точности соответствует диаграммам остойчивости правильного цилиндра или эллипсоида с круговыми шпангоутами (Рис. 12).

Соответственно, практические диаграммы остойчивости произвольного корпуса корабля лишь отображают искажение гидростатических свойств относительно равнобольёмных цилиндрических обводов. Важно отметить, что круговые цилиндры или эллипсоиды не привносят дополнительной остойчивости формы, изначально обладая абсолютной остойчивостью для всего диапазона углов крена от ровного киля до оверкиля, то есть, без физической возможности опрокидывания. Соответственно: наличие углов заката на диаграммах остойчивости реальных судов должны интерпретироваться либо в качестве грубейших проектных 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 опас-

ности непредвиденного и мгновенного опрокидывания корабля в штормовом плавании, или при незначительных повреждениях 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 ϑ и водоизмещения относительно равнообъёмной начальной осадки z.

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

$$l(\vartheta) = l_0(\vartheta, z) - (Zm(\vartheta, z) - Zm) \cdot \sin(\vartheta). \quad [m] \quad (1)$$

«*ЦТ над центром величины*» – вариант фиксации центра тяжести на величину Zm относительно мгновенного центра величины Zc в условиях крена ϑ и вертикальной качки z характеризует проектные качества формы корпуса и запас остойчивости при больших углах накренения:

$$l(\vartheta) = l_0(\vartheta, z) - (Zc(\vartheta, z) + Zm) \cdot \sin(\vartheta). \quad [m] \quad (2)$$

«*Относительно ватерлинии*» – альтернативная оценка остойчивости с аппликатой центра тяжести над действующей ватерлинией, необходима для проектных оценок начальной остойчивости корабля при относительно малых углах крена

$$l(\vartheta) = l_0(\vartheta, z) - (z(\vartheta) + Zm) \cdot \sin(\vartheta), \quad [m] \quad (3)$$

где: z – расчётное значение осадки при равнообъёмном накренении корпуса.

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

$$l(\vartheta) = l_0(\vartheta, z) - (T + Zm) \cdot \sin(\vartheta), \quad [m] \quad (4)$$

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 [10], с воз-

можностью уточнения по Кочину [4] 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.

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

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 λ и длиной корабля L : $(\lambda/L) = V^2 / L \cdot 2\pi/g$, определяет критерии относительной по корабельному волнообразованию скорости хода, как критерий Фруда:

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

из которого следует видимая форма излучаемой волны с максимальной длиной:

$$(\lambda/L) = 2\pi \cdot F_n^2$$

или

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

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

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

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

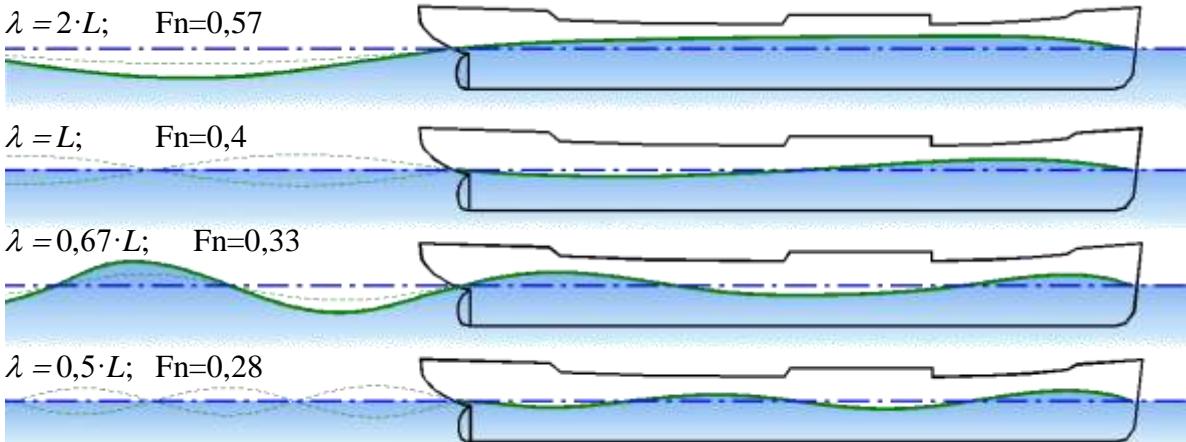


Рис. 13. Характерные режимы волнообразования при различных скоростях движения судна $V \approx 1.25 \cdot \sqrt{(\lambda/L) \cdot L} = 1.25 \cdot \sqrt{\lambda}$ [м/с].

Рис. 13 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.

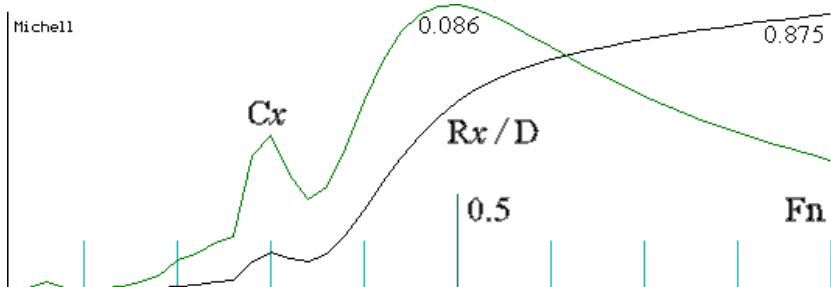


Рис. 14. Характерная форма и расчётные оценки волнового сопротивления для хорошо обтекаемого корпуса корабля. C_x – коэффициент сопротивления; R_x/D – удельное сопротивление. Хорошо видны экстремумы сопротивления при неблагоприятной интерференции носовой и кормовой систем поперечных волн, возникающей 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.

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

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

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

Для оценки формы корпуса и волнового сопротивления 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.

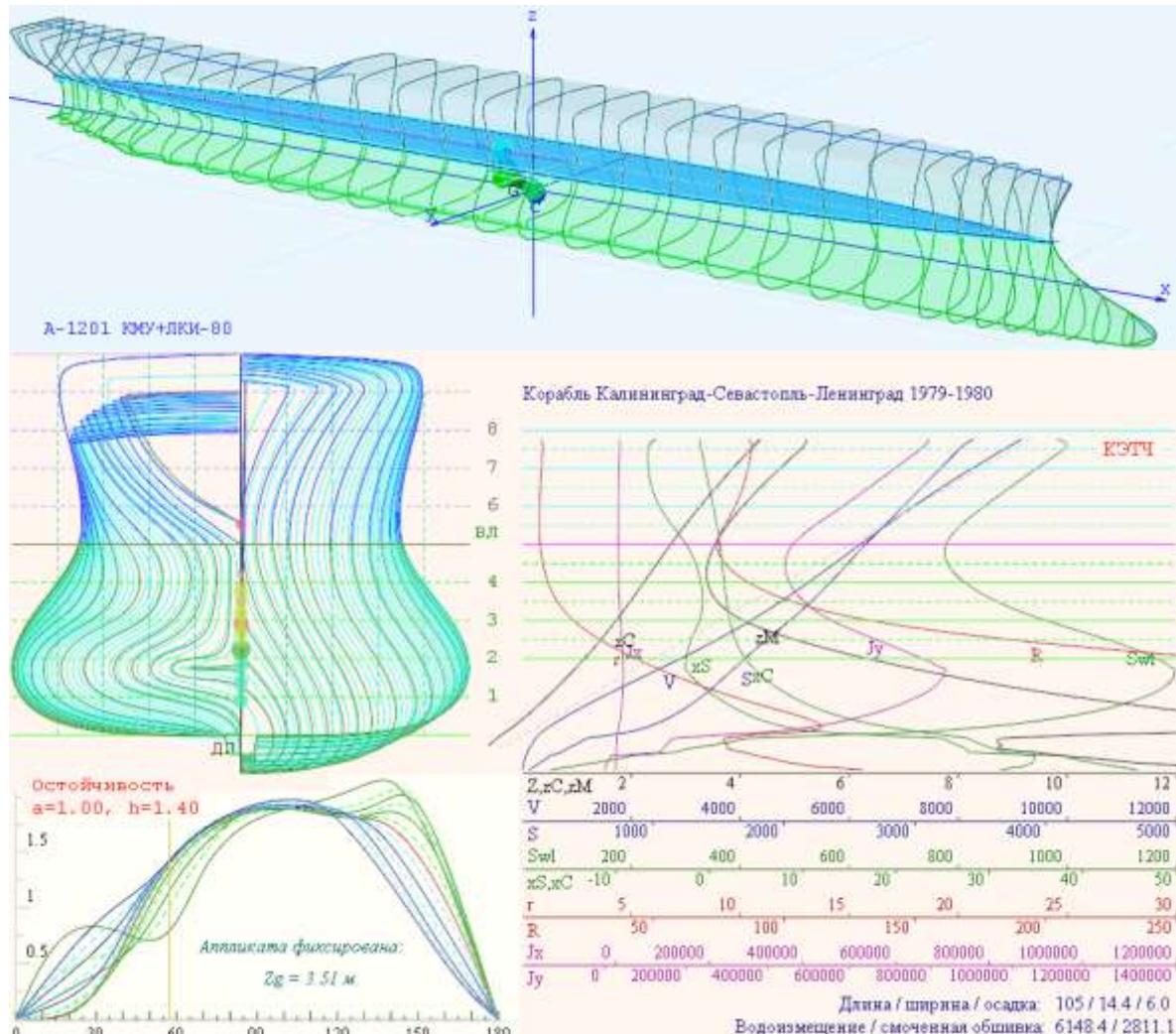


Рис. 15. Компонентами вычислительного эксперимента являются средства визуализации гидростатических характеристик корпуса и остойчивости корабля, с различными вариантами трёхмерной прорисовки корпуса для анализа проектных решений. Слева, под проекцией корпуса показаны кривые остойчивости при различных осадках для нулевой метacentрической высоты при фиксированной аппликате центра тяжести, что соответствует реальной динамике корабля в штормовых условиях. Правее приведены гидростатические кривые для выделенных осадок.

Предварительные опыты проводились с малыми моделями (Рис. 15) на тихой воде и волнении, которые послужили проектированию экспериментальной гипоте-

тической модели для испытаний в 1985 году в опытном бассейне кафедры теории корабля Ленинградского кораблестроительного института (Рис. 3).

В модели МИДВ «клиперские» обводы в оконечностях не устраивались ввиду необходимости проведения опытных экспериментов в широком диапазоне осадок, отчего ватерлинии от днища до палубы устраивались по возможности эквидистантно. В испытаниях наблюдались интенсивные расходящиеся волны, порождаемые (по Алымову) в зонах приполненной носовой скулы. Расходящаяся корабельная волна затем фиксировалась в расчетах волнового сопротивления, показывая пик на скоростях хода по Фруду порядка $F_n \approx 0,4$.

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

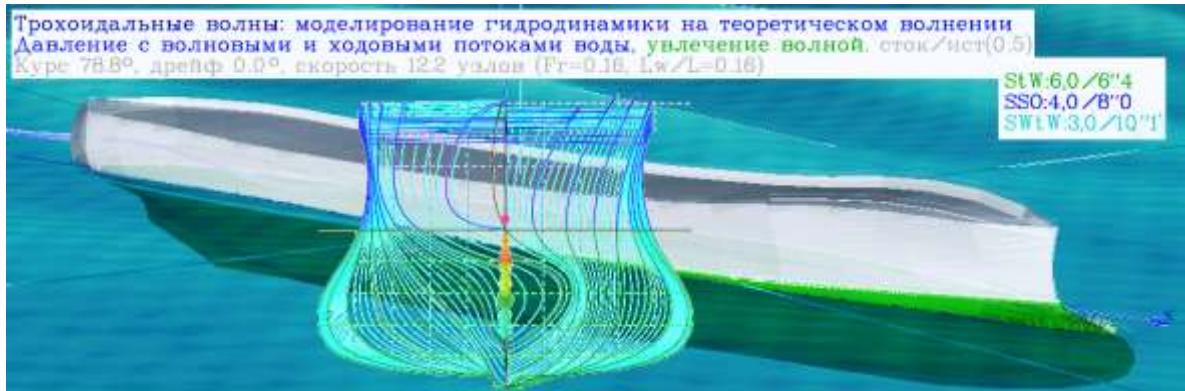


Рис. 16. Универсальное транспортное судно (A1203-Univer-86) с завалом борта на уровне твиндеков под верхней палубой, представленное руководителю, профессору Александру Николаевичу Холодилину в качестве основного результата мореходных испытаний в опытном бассейне в ЛКИ в 1985 году. Апериодический режим бортовой качки при нулевой начальной остойчивости; и плавность кильевой качки предотвращает заливаемость верхней носовой палубы, несмотря на снижение высоты форштевня,строенного для предотвращения силового захвата корпуса встречной волной.

В процессе экспериментов в опытном бассейне Ленинградского кораблестроительного института прорабатывались перспективные обводы для тяжёлого транспортного судна и многоцелевого судна среднего водоизмещения (Рис. 16).

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 представлен ниже (Рис. 18).

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 подынтегральных выражений с использованием базовых законов гидромеханики, в размерном виде, позволяет своевременно включать в расчёты аде-

кватные 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: $\Lambda = 2\pi \cdot V^2/g$, проявляющейся за кормой корабля, где V [м/с] – скорость хода корабля.

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

$$R_x = -\frac{\pi}{2} \cdot \rho V_0^2 \int_{\Lambda} A^2(\lambda) \cdot \frac{\delta \lambda}{\lambda \cdot M^3 \sqrt{M^2 - 1}} .$$
(5)

Безразмерное число $M = \sqrt{\Lambda/\lambda}$ – будет соотношением длин для максимальной поперечной волны Λ [м] к расчетной фазовой волне λ [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 трохоидальных волн на воде.

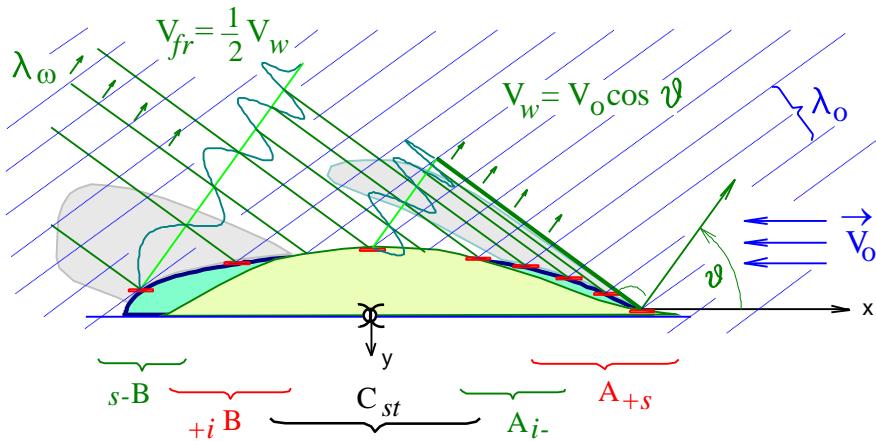


Рис. 17. Волнообразование, как процесс отражения волн от поверхности корпуса корабля.
В зонах A_{+s} и $s-B$ происходит рост гребня трохоидальной волны, неспособной оторваться от корпуса судна.

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 λ , измеряемая вблизи смоченной обшивки корпуса корабля x_0, y_0 ; R_x – силовая реакция корабельного волнообразования на скорость хода V_0 ; $M = \sqrt{\Lambda/\lambda}$ – соотношение длин для максимальной поперечной волны Λ к расчетной фазовой волне λ ; $k = 2 \cdot \pi / \lambda = g / (V_0^2 \cdot \cos^2 \vartheta)$ – волновое число для данной фазовой волны;

$\omega_0 = x_0/M + y_0 \cdot \sqrt{M^2 - 1}/M$ – фазовый отсчет расходящейся волны с параметром отставания M для элементарного приращения интенсивности корабельной волны от локального участка корабельной обшивки с координатами x_0, y_0 .

Механико-геометрическая интерпретация гидродинамических процессов в интеграле Мичелла (Рис. 17) связывает процессы отражения от корпуса корабля внешних волн, условно набегающих под косыми углами ϑ в диапазоне длин: $\lambda \in [0 \div \Lambda = 2 \cdot \pi \cdot V_0^2/g]$, где: Λ – длина поперечной корабельной волны, соответствующая скорости хода V_0 .

В оконечностях корпуса в зонах: $s\text{-B}$ 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.

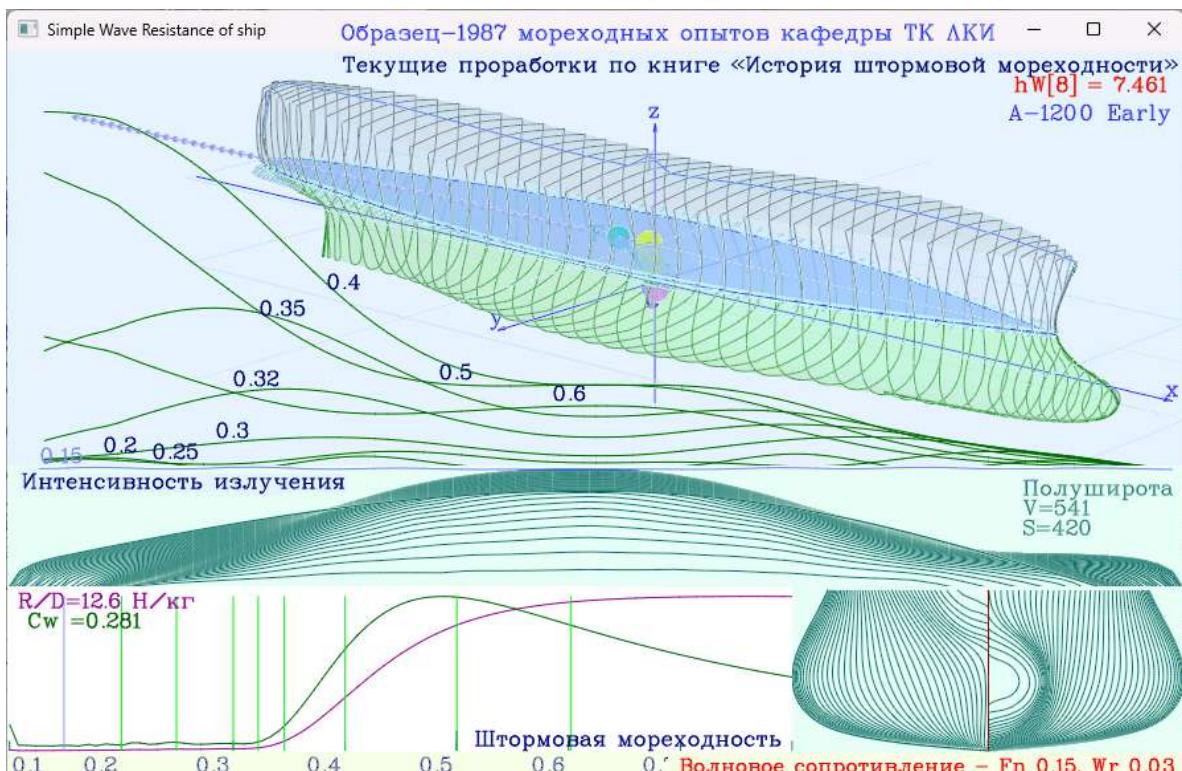


Рис. 18. Вариант расчётов корабельного волнообразования с представлением графиков относительного сопротивления движению на единицу водоизмещения корабля R/D [N/kg], и коэффициентов волнового сопротивления C_w . Верхние графики показывают интенсивность излучения волн с учётом интерференции вдоль корпуса корабля на различных скоростях хода. Справа-внизу приводятся теоретические шпангоуты, действовавшие в алгоритмах интегрирования при моделировании излучения отражённых корпусом корабельных волн. Здесь улучшенные обводы показывают практически идеальный минимум волнообразования на скоростях до $F_n \leq 0,4$, и отсутствие значительного роста относительного волнового сопротивления R/D на скоростях по Фруду более $F_n > 0,6$.

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 форми-

роваться 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 [13] «Поисковые исследования штормовой мореходности корабля»;

«**F8**» – Академический алгоритм Ленинградского кораблестроительного института (Корабелки) по Александру Николаевичу Шебалову;

«**F9**» – Проверенные математические модели и алгоритмы Ады Шоломовны Готман (расчёты кривые по Мичеллу, их главные части и уточнение до остаточного сопротивления).

Независимое графическое окно для процедуры «Wave» разбивается на четыре площадки (Рис. 18):

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

– слева внизу – графики: C_w – коэффициентов волнового сопротивления и R/D [$\text{Н}/\text{кг}$] – 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 «половина широты». 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 огнихи в изображении, которые по команде «**Ввод**» могут быть исправлены путём полного пересчета. Клавишей «**Таб**» 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 трохоидального 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 трохоидального 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 «Аурора». 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 $\overset{\rightarrow}{\delta V}$ [м/с], с изменением интенсивности углового поворота $\overset{\rightarrow}{\delta \omega}$ [с⁻¹] относительно мгновенного центра величины L [м] из предыдущего шага вычислительного эксперимента во времени.

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

где $\mathbf{r} [\delta]$ – тензор ориентации корабля – главные оси корабельного базиса; $\overset{\leftarrow}{W} [\text{кг}]$ – вектор гравитационной силы тяжести корабля – исходное водоизмещение; $vS [\text{кг}]$ – вектор архимедовых сил всплытия по нормали к волновому склону под осреднённой поверхностью действующей ватерлинии – объём погруженных обводов корпуса; $\overset{\leftarrow}{L} [\text{м}]$ – вектор отстояния мгновенного центра величины от фиксированного центра масс корабля – плечо пары сил; $\overset{\times}{M} [\text{кг}\cdot\text{м}^2]$ – массовый (объёмный) момент инерции корпуса, 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 корректировке по аппликате, в едином представлении можно приводить центр инерции к центру тяжести корабля с использованием формул Гюйгенса-Штернера.

Основной вектор архимедовых сил всплытия $vS [\text{кг}]$ 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 $h_z [\text{м}]$:

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

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; $\overset{\leftarrow}{S}$ – вектор нормали с площадью элементарного треугольника в корабельном базисе; $\rho = 1025 [\text{кг}/\text{м}^3]$ – условная плотность морской воды.

Свободный или главный вектор силы гидростатического давления на смоченную обшивку корпуса просуммируется:

$$\overset{\leftarrow}{vS} = \sum_{\Delta} g \cdot h_z \cdot \overset{\leftarrow}{\delta s} \quad [H/\rho, \text{м}^4/\text{с}^2]$$

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

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

⁷ В уравнениях движения в делителе всегда присутствуют масса или моменты инерции, что формально позволяет опускать множитель: ρ – плотности воды.

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

$$\overset{\leftarrow}{vR} = g \cdot \sum_{\Delta} h_z \cdot (\overset{\leftarrow}{r_\Delta} - \overset{\leftarrow}{G}) \times \overset{\leftarrow}{\delta S},$$

[$H \cdot m/\rho, m^5/c^2$]

где: $\overset{\leftarrow}{r_\Delta}$ – вектор для точки концентрации сил от давления воды на элементарном треугольнике, с учётом поправки на заглубление вертикальной компоненты h_Δ , G - координаты центра масс корабля, δS – 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 [12] (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:

$$\overset{\leftarrow}{v_n} = (\overset{\leftarrow}{n} \cdot \overset{\leftarrow}{v}) \cdot \overset{\leftarrow}{n}.$$

[m/c]

Асимметрия отражённых импульсов скорости:

$$\overset{\leftarrow}{v_n} \times = I + (I - k_v) \cdot \overset{\leftarrow}{n_v},$$

где k_v – параметр в модели искусственного рассогласования условий непротекания 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:

$$\overset{\leftarrow}{v_s} = [\overset{\leftarrow}{n} \times \overset{\leftarrow}{v}] \times \overset{\leftarrow}{n} = \overset{\leftarrow}{v} - \overset{\leftarrow}{v_n}.$$

[m/c]

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

$$\overset{\leftarrow}{v_\perp} = (\overset{\leftarrow}{n} \cdot \overset{\leftarrow}{v}) \cdot \overset{\leftarrow}{n} + \overset{\leftarrow}{n} \times [\overset{\leftarrow}{n} \times \overset{\leftarrow}{v}] = \overset{\leftarrow}{v_n} - \overset{\leftarrow}{v_s}.$$

[m/c]

Результирующий вектор силы на элементарном треугольнике:

$$\overset{\leftarrow}{\delta f_\Delta} = p_\Delta \cdot \overset{\leftarrow}{\delta S} = \rho \cdot \left(\frac{V^2 - |\overset{\leftarrow}{n} \times \overset{\leftarrow}{v_s}|^2}{2} + \frac{\pm (\overset{\leftarrow}{n} \cdot \overset{\leftarrow}{v_n})^2}{2} \right) \cdot \overset{\leftarrow}{\delta S},$$

[$H = \kappa \cdot m/c^2$]

где: V – скорость хода корабля, p_Δ – 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:

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

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

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

$$\overset{\leftarrow}{dV} = (\overset{\leftarrow}{vF} (iF \cdot dZ) + \overset{\leftarrow}{vB} \cdot iV) / (iF \cdot dZ + iV) \quad [m]$$

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 $\mu F(\xi, \eta, \zeta)$:

$$\overset{\rightarrow}{vC} = \overset{\leftarrow}{dV} \cdot \tanh \mu + \overset{\leftarrow}{vD} \cdot (1 - \tanh \mu). \quad [m]$$

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 ω , проходящей через точку vC :

$$\overset{\rightarrow}{Locate} = \vec{r} \cdot (V + \overset{\times}{vC} \times \overset{\leftarrow}{\omega}) \cdot \delta t, \quad [m]$$

где r – тензор локального базиса корабля; V – текущая скорость хода; ω – 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 обще-корабельной архитектуры, что позволяет проводить вычислительные эксперименты в реальном масштабе времени, с соблюдением инерционных характеристик, пульсаций скорости и периодов качки в наглядном представлении штормовой мореходности настоящего корабля.

Морское волнение моделируется ячеистыми трохоидальными 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 шторма⁸ по курсу корабля на Nord с ходом «вразрез волне» 15° 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 переменчивой 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 «полбorta» и «на борт» (*угловая скорость изменения курса на циркуляции здесь не зависит от скорости хода*).

Скорость хода регулируется условной «тягой движителей», 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, отмеряемую от метацентра тихой воды, соответственно, относительно этого метацентра 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,

⁸ Сложение девятых валов превышает 16 м – почти невозможная оценка опасности сверху.

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 киля»).

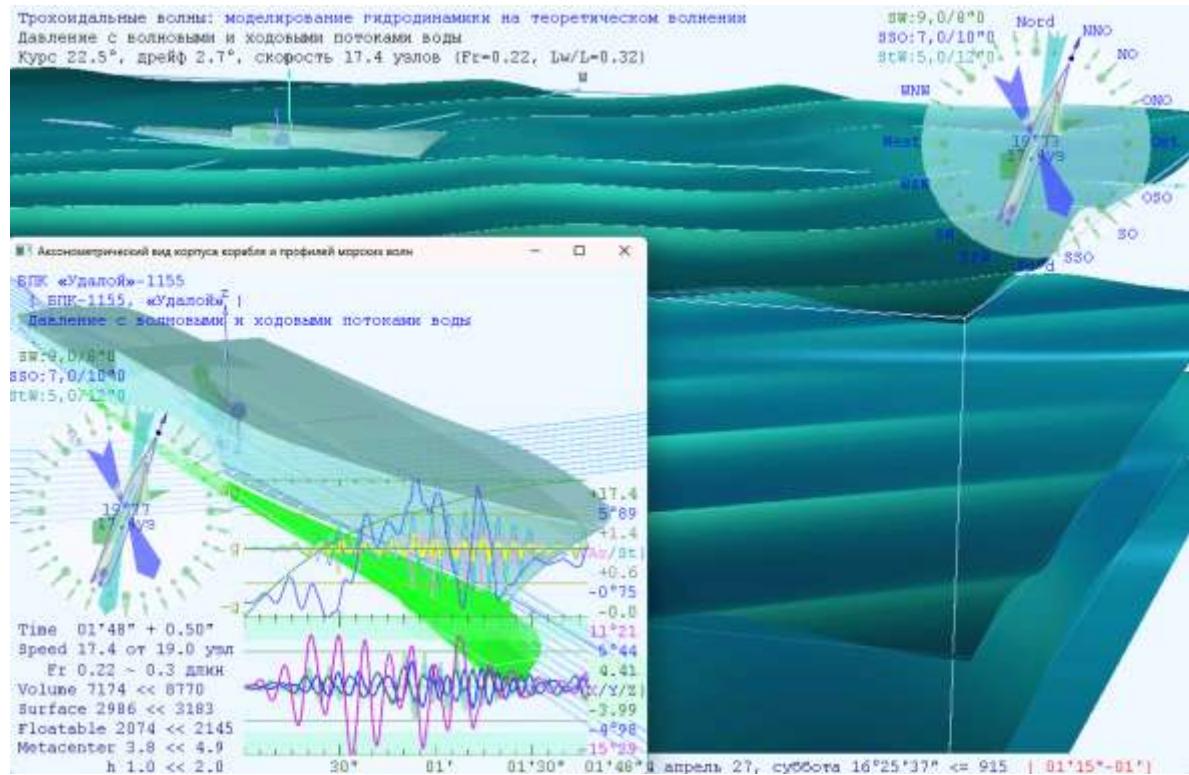


Рис. 19. Изображение всех волновых полей, корабля и маршрута его движения для наглядного представления хода вычислительного эксперимента. В верхних строках записываются действующие режимы моделирования морского волнения и гидромеханики корабля. В нижней строке текущее компьютерное время и количество выполненных циклов. Красные отсчеты минут означают нехватку вычислительных ресурсов, и отставание вычислительного эксперимента от реального времени.

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

Для быстрого выведения 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:

1 – Текстовая консоль с подзаголовком:

«**Штормовая мореходность корабля (вычислительный эксперимент)**» – с текстовой информацией об исходном состоянии корабля, о характеристиках трёх групповых структур морского волнения, о геометрических и динамических параметрах корпуса, ходости и удержания корабля на курсе.

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 - 0:7ψ17 - В.Храмушин

>>> Краснознамённый ордена Октябрьской революции крейсер «Аврора»

>> {L=123.7, B=16.8, T=6.4, Ψ=00' \δd=0cm}^6.4 № A.103<+147+>113.Φ> Statum{4}

Волна: λ=56м, τ= 6", ζ=6/0.89м, C=9.4 м/с, A=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 }			
Time 03'06" + 0.20"	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(∂) заданный => 67.3° <0.2> 67.5°		33485.8 -0.0 4592476	
крен 8.2°, дифферент 0.7°	μV: 50.1±0.9 50.8±0.9 50.6±0.9		
Скорость 17.1 из 18.0 узлов	ω: 90.2±0.9 ψ0.6±0.9 χ0.8±0.9		
	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}

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:

«Аксонометрический 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. 19), где имеются краткие контекстные подсказки: <**F1**>, и меню настройки основных параметров: <**F4**>.

3 – Графическое окно вычислительного эксперимента в целом:

«**Корабль и трохоидальные 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 разрежаться 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 количество шагов и время проведения эксперимента, с отметкой запаздывания для реальных отсчётов в случае нехватки вычислительных ресурсов.

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

<**Shift+Стрелки**> и <**мышька 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 «Aurora».

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 настигать 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 внутри 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»**, основной рабочий режим: 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»*).

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 условно автоматическое управление «рулем», при котором в движение корабля привносится дополнительная скорость циркуляции, величина которой характеризуется по аналогии естественным командам на руль как: «помалу», «руль полбorta» (*7-влево, 9-вправо = 120 сек на полный круг циркуляции*) или «руль на борт» (*4-влевоб 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 перекладывается в режим «помалу» (*240 сек*), что придаёт кораблю циркуляцию вдвое меньшую, чем «руль полбorta». 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 перекладкой 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 переназначаться, 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 Фруду (*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 полбorta;

<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 вперёд; **<2>** – два узла тише ход и назад;

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

<1> – добавляется крен 30° левый борт; **<3>** – плюс 30° 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 от пусканием **<Ctrl>** (обнаружилось, что Windows не связывает эти команды 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 программой Free!Ship⁹ 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.

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.

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».

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

Выходной формат модели корпуса корабля

Free!Ship exchange format (треугольники)	.fef
Wavefront Technologies Advanced Visualizer	.obj
Шпангоуты и контуры диаметральной плоскости	.dc2
Контурная модель в трёхмерной проекции	.dc3
Корабль с контурами и обшивкой корпуса	.dc3

Aurora.mtl

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

⁹ ShipDesign.ru/SoftWare/Aurora.z

прозрачность или особую освещенность цифровой модели корпуса, или переназначить реальную расцветку модели корабля.

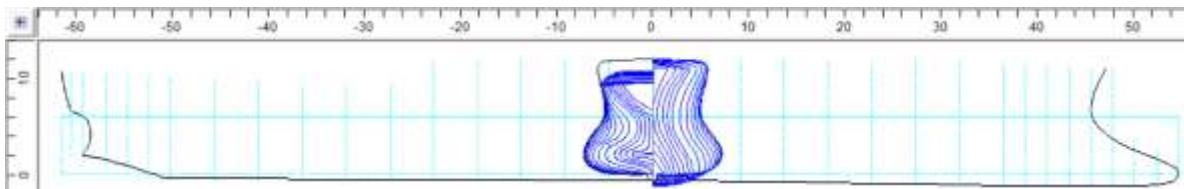


Рис. 20. Вариант экспорта модели корабля для работы в DesignCAD-express (*.dc2) в традиционном двумерном или «бумажном» представлении теоретических чертежей. Здесь совмещаются проекции бок и корпус, с разметкой аппликат относительно основной линии.

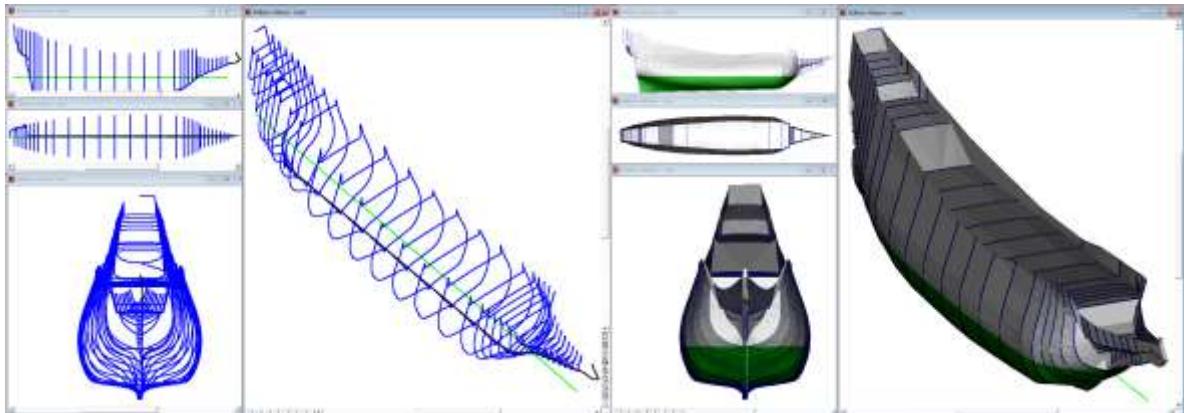


Рис. 21. Корабль «Васа», экспортенный в трёхмерный проект корпуса для работы с программой DesignCAD (*.dc3). Аппликаты приведены к ватерлинии. Слева четыре проекции контурной модели корабля, справа – с треугольниками бортовой обшивки, в том виде, как они задействуются в вычислительном эксперименте.

Для последующей правки цифровой модели (Рис. 20, Рис. 21) 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 пространственного представления корпуса. Выполняется также предметное связывание в блоки элементов корпуса корабля, и тематическое разделение графических объектов по нумерованным и именованным слоям:

0 – <имя файла цифровой модели корабля>.dc2

1 – Grid – светло-голубая разметка сетки шпангоутов, основной линии и ватерлинии в проекции бок (Рис. 20), с пространственная разметка габаритов корпуса;

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

3 – Stern and Stem line – контуры корпуса на пересечении с диаметральной плоскостью в проекции бок теоретического чертежа, разделяются на опи-

сания по форштевню и ахтерштевню, с записью в последовательности по возрастанию аппликат точек на штевнях;

4 – Aft and Bow breadth – поперечная проекция по тем же контурам штевней на диаметральной плоскости, но с ординатами транцевых или бульбовых расширений по тем же отсчетам аппликат, которые требуются 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. 21-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 горизонтальными днища и палуб из проекции «бок» теоретического чертежа.

5 – Hull plating – треугольники обшивки формируются строго по тем же алгоритмам (Рис. 21-справа), что и в процессе проведения вычислительного эксперимента.

Дополнительно при формировании файла числовой модели выполняется группировка связных 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. «Аксонометрический 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. 23) 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. 20, Рис. 21): Free!Ship.fef, WaveFront.obj и DesignCAD.dc2/3, последний в виде листа теоретических чертежей; трёхмерной контурной модели и модели с обшивкой.

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

стандартном 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 взаимодействия корабля с морским волнением, та же, что и в синхронно работающем окне для вычислительного эксперимента на трохоидальном 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 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 {*ξ-продольная, η-поперечная, ζ-вертикальная*} и угловых скоростей {*θ-бортовая, φ-килевая, χ-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

Ship Целевое проектирование, теория и штурмовая мореходность корабля.

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

§ «Управление ходом корабля»
<8/2> ± два узла вперёд/обратно
<7/9> ± румб влево/право полбпорта
<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/контуры
<Ctrl/+Shift> задержка или стоп
<стрелки•leftMouse> ориентация
<+Shift•rightMouse> смещение
<+Ctrl•(roll)> дальность, наклон
<+<Shift>> исходный обзор
<BkSp> прекращение волнения

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 кильевая: 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

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

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 «Вовлечь в кинематику волн», с сильной стратификацией скоростей под гребнями трохоидальных волн. Корпус корабля оказывается под воздействием сильных поперечных ускорений внутри волновых потоков, где величина метacentрической 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.

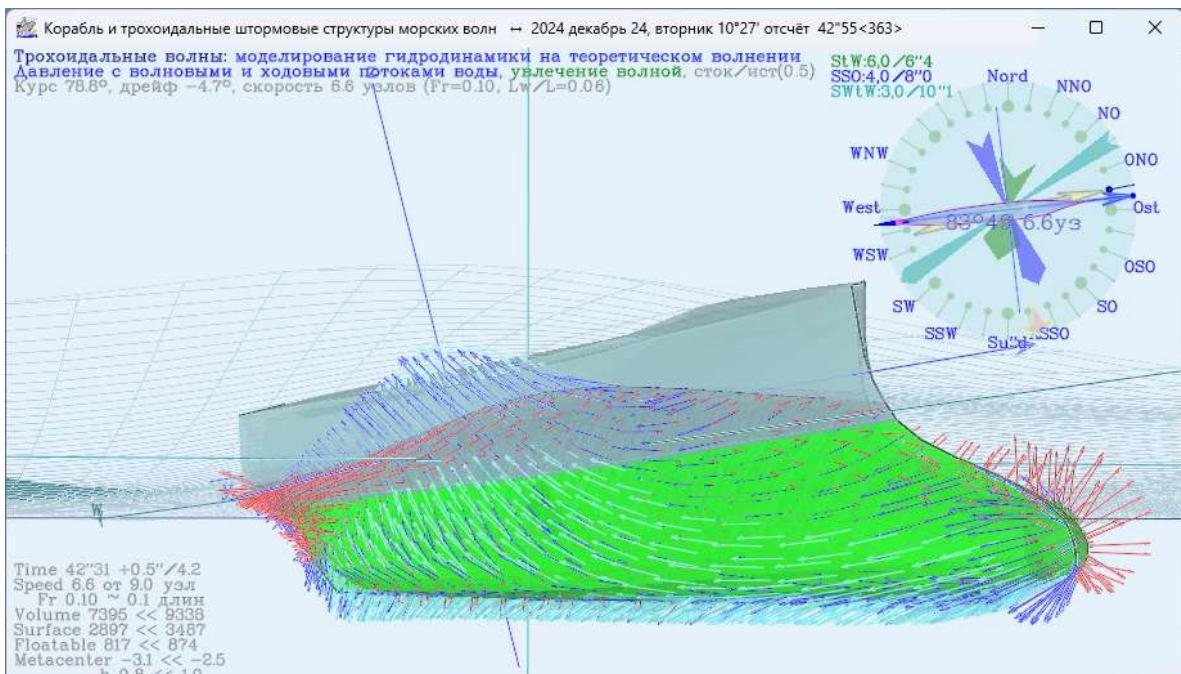


Рис. 22. Поток по смоченной обшивке. Прорисовка голубыми стрелками набегающих и волновых потоков вблизи корпуса; с разложением синими стрелками по скользящим течениям для модели вихревого слоя по смоченной обшивке; с распределением источников/стоков для модели непротекания корпуса. Масштаб стрелок показывает ежесекундные смещения частиц воды на фоне геометрических размерений корабля.

В этой же строке изменяется «Практическая осадка», отмеряма относительно основной линии. Цифровая модель корпуса заново считывается из файла, после чего автоматически перевычисляются все инерционные, гидростатические и геометрические характеристики корпуса, с приведением поперечной метacentрической 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 исполняется 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 вариантов отображения скоростей течений вблизи судовой обшивки.

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*» – фиолетово-выми 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**>.

В нижней строке переключается метод прорисовки судовых поверхностей с закраской, либо с помощью рёбер треугольников (Рис. 23):

«*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 окончностях [м/с²], 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. 23) 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 метацентрические характеристики корпуса на ходу на волнении.

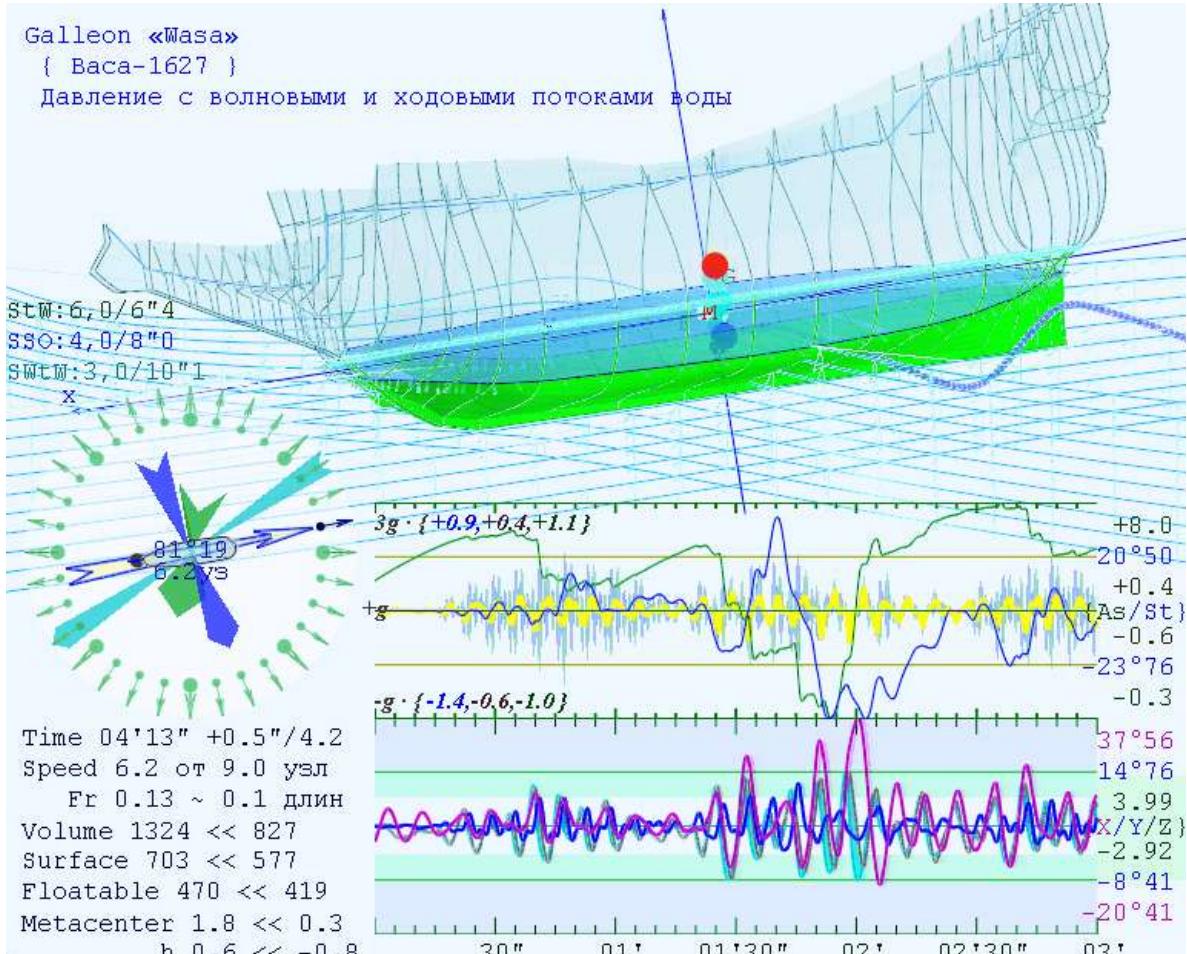


Рис. 23. Ход вычислительного эксперимента в окне для представления гидромеханики корабля. Вертикальная качка превышает 7 метров. Сильное рыскание и дрейф по курсу возникает в моменты экстремальной бортовой качки. Внизу графики бортовой X, килевой Y и вертикальной Z качки с масштабной шкалой справа. На левой шкале верхних графиков масштаб для кривых вертикальных ускорений.

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 половине вертикального масштаба нижнего поля, при этом уровень моря вблизи корабля может зашкаливать за горизонтали 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 том – 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. 23), синим –по корме; зеленым – 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 не закреплённый (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, кильевой и вертикальной качки.

Можно обратить внимание, что эпизодически происходит сильная раскачка корабля под воздействием крутых гребней в средней части групповых структур трохоидального волнения, и особо при встрече с девятыми 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. Тремя стрелками на картушке показываются 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 окру-

жении на море, что в целом востребуется в практике проектных изысканий для все-погодного 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 трохоидальном 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 «Контуры шпангоутов...» (Рис. 23) 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 динамический 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 вертикалам от центра величины на величину поперечного метацентрического радиуса $r = J / W$ [м], как частного от момента инерции площади действующей ватерлинии J [м⁴] с делителем по исходному водоизмещению корабля W [м³].

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

Важно заметить, что все эти метацентрические характеристики никак не действуются 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 девятыми 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, 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);

Sea: Вычислительный эксперимент, штормового маневрирования корабля в открытом море

F1 – краткая справка

F4 настройка волнового режима

F8 штормовая гидромеханика

§ « Управление ходом корабля »
<2/2> ± два узла вперёд/обратно
<7/9> ± румб влево/право полбпорта
<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
<+<Shift>> исходный обзор
<BkSp> остановка волнения

Вычислительный эксперимент

Математическая модель штормовых волн

Высокие волны с дрейфовыми течениями

Раскраска сине-зелено-пенных склонов

Тёмная вода с освещёнными 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

«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);

«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-пенниых склонов» (цветовая раскраска волнения);

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

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

«Профили волнения по курсу и траперзу» (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 исказили 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 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 опытных испытаний штормовой мореходности

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 опытных 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 несуществен. 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 \vee – или отмечается возможность выбора вариантов физической раз- мерности или масштаба для входного параметра.

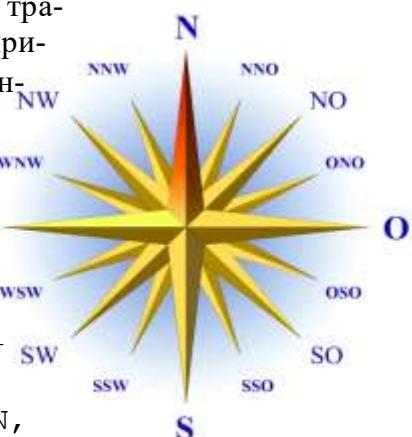
Значимые величины применяются в различных, ниже оговариваемых нотациях и физических величинах. Линейные размеры в абсолютных измерениях за числовой величиной должны отмечаться символами физических размерностей, как: «м»-метры; «дм»-дециметры или «см»-сантиметры.

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 ‰ – промилли для указания целочисленных значений в сотых или тысячных долях относительных размерений.

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 [☀\vee*] навигационной картушки.

Четыре главных румба отмечаются одной прописной буквой или целым словом для указания сторон света: **Nord**, **Ost**, **Süd** 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, Ctn,
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 [$\odot \vee^\circ$] – в румбах [$*$] \vee или в градусах [$^\circ$] в географических отсчетах от северного меридиана ($+180^\circ$ на восток, -180° к западу), градусные обозначения можно опускать (измерение углов в радианах здесь не предусматривается);

2 – требуемая скорость хода [$\Delta \vee$ узл \vee м/с] – в соотношениях длины корпуса с длиной корабельной волной по Фруду: $F_n = V / \sqrt{g \cdot L}$ [Δ – без указания размерности]; \vee или скорость V – в узлах, где одна угловая минута по меридиану или морская «равнообъемная» миля в час [узл...]; \vee 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 опытных и вычислительных экспериментов Ленинградского кораблестроительного института;

3 – рабочая осадка [$\pm \Delta \vee$ м, дм, см] – при явном указании знака числовой величины выполняется изменение осадки δT [\pm м] – аппликаты конструктивной ватерлинии; \vee 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 [$\pm \Delta \vee \% \vee^\circ \vee$ м] – знак «+плюс» – дифферент на нос, знак «–минус» – на корму. Угловой отсчет ψ [\pm°] в градусах, или \vee безразмерная величина относительно осадки, с возможностью масштабирования в процентах и промилях (тысячных долях), или непосредственно \vee [\pm м] как размерная величина $\delta d = (T_{\text{корма}} - T_{\text{нос}})/2$ устанавливается относительно полудлины корпуса по видимым изменениям уровня водя 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.

5 – метацентрическая высота h [$\Delta \vee \% \vee$ м] – фактически определяет аппликату центра тяжести корабля $zG = zM - h$ – относительно поперечного метацентра zM на тихой воде. Задается в долях заданной ширины корпуса [$\Delta \vee \%$], или фиксируется¹⁰ 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

¹⁰ Российский морской регистр судоходства перестраховывает величиной минимальной метацентрической высоты $h \geq 0,5$ м, отчего штормовая мореходность среднетоннажного судна утрачивается на ранних этапах проектирования. Запрет отрицательной начальной остойчивости грозит опрокидыванием.

избежание сложностей, начальная аппликация центра тяжести ограничивается величиной осадки корпуса над ватерлинией.

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

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 вычислений давления воды в толще под трохоидальным 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 трохоидальных 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 трохоидальном 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 условиях по умолчанию это:

$$\mu : \{ \xi=0,1 \eta=0,8 \zeta=0,6 \} \text{ – продольной, поперечной и вертикальной качки}$$
$$\mu : \{ \vartheta=0,2 \psi=0,6 \chi=0,8 \} \text{ – для бортовой, килевой качки и рыскания.}$$

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.

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

где V – скорость качки; μ – фактор демпфирования; δt – расчетный шаг времени.

На расчетных площадках с отрицательным фактором отраженных потоков действует парадокс Даламбера по взаимокомпенсации источников и стоков из условий непротекания. $Kv = 0,5$ – 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.

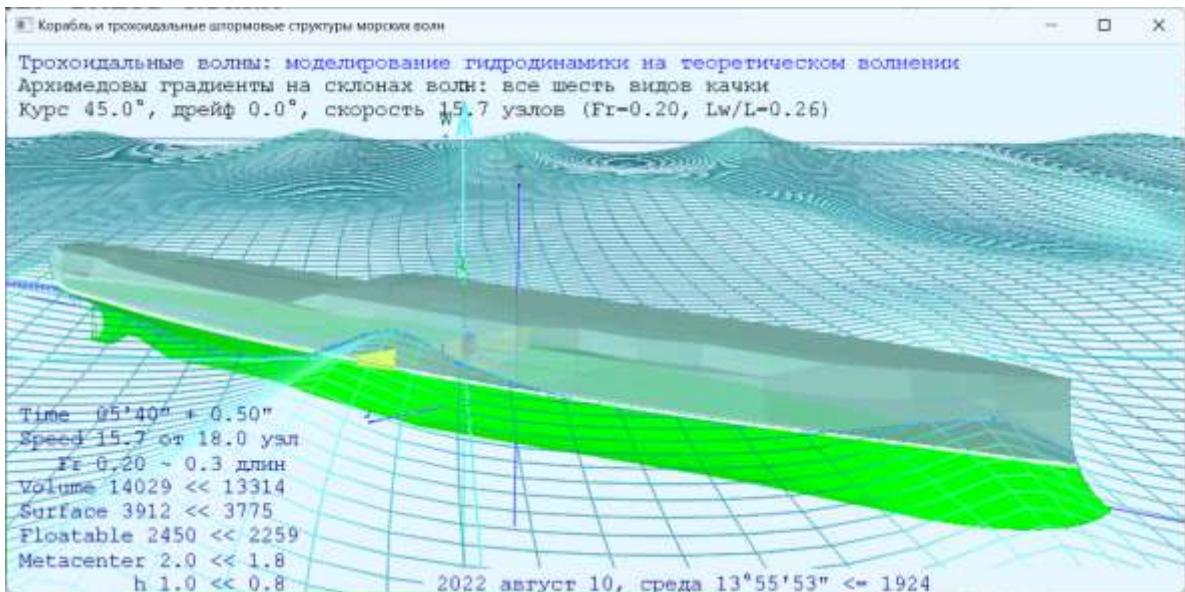


Рис. 24. «Корабль и трохоидальные штормовые структуры морских волн» – воспроизведение морского волнения в опытных изысканиях мореходности корабля в условиях штормового плавания. Контурные прорисовки профилей трохоидальных волн большой крутизны выполняются на фоне соизмеримой по высоте длиннопериодной зыби.

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

Среди ключей может указываться интервал времени для графиков в окне «Аксонометрический 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 – 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 наиболее «**больших**» значений из регистрируемых экстремальных событий. При отсутствии ключа «**больш**» в протокол последовательно заносятся все максимумы замеряемых 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 трохоидального волнения на море:

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

2 – высота волны $\zeta_w [\Delta \vee \% \vee m]$ – в долях от максимальной высоты обрушающегося гребня $[\Delta]$, или \vee в процентах и промилях в отношение к осадке корпуса корабля $[\% \vee]$, или \vee по расчетной высоте¹¹ в метрах $[m]$,

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 картушки¹² компаса;

4 – номер или фазовой отсчёт первого вступления фронта трохоидальной волны. 0 – нулевая фаза волны на границе опытного 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 $[\Delta \vee m]$ задается в отношениях к длине корпуса цифровой опытной модели $Long/L [\Delta]$, или \vee в абсолютных измерениях $\lambda [m]$ в метрах. Размерность указывается следом за двумя числами 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 трохоидальной 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 девятыми валами. Ввиду сложностей отражения волн от быстро-

¹¹ Расчетная высота волны – удвоенный радиус трохоидальной траектории на уровне невозмущенной поверхности воды.

¹² Направление ветра задаётся внутрь картушки компаса, откуда ветер видится; волны бегут из картушки по видимому с борта судна направлению.

- движущихся 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 поверхности 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 трохоидальный процесс с динамически распределением расчетных узлов со значительно различающейся геометрией смежных ячеек в аппроксимациях волновых полей и подводных пространств.

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

При пропуске инициирующих 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 загрузка (осадка), дифферент, метацентрическая высота и модель гидромеханики;

Демпфирование: 0.1 0.8 0.6, 0.2 0.6 0.8, 0.5 { $\xi \eta \zeta$ }м, { $\vartheta \psi \chi$ }, Ср

– первые две тройки чисел по абсциссе-ординате-аппликате, 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

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 «Aurora.vil» для предварительной инициализации цифровых моделей, который будет первым заменять принятые по умолчанию исходные параметры и условия проведения вычислительного эксперимента в комплексе «Aurora».

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 ' : '.

Штормовая мореходность и маневренность корабля <прямой вычислительный эксперимент>
Ленинград, Кораблестроительный институт \ Санкт-Петербург, Государственный университет,
Научно-инженерное общество судостроителей имени А. Крылова - штормовая мореходность
«МИДВ» ©72-2023 Сызрань-Калининград-Севастополь-Ленинград-Владивосток-Сахалин-Дальний В.Храмушкин

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 волн 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 =бм (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 → разделитель)

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|м] при указании знака числа — изменение осадки, иначе её переназначение текущей

trim [+°|+м] дифферент в угловой мере [+°], или по изменениям посадки в окончностях [+м]

hX [Δ%|м] метацентрическая высота в долях ширины корпуса или по абсолютной величине[м]

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 скользящего потока с импульсами отражения от корпуса корабля

4 ÷ ≈ набегающий поток дополняется скоростями течений под гребнями штормовых волн

Kv: [0.5] — фактор парадакса Д'Аламбера; [0÷1[— к условию непротекания сток/исток

Flow [true|1\0] вовлечеие 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 } - пульсации хода, попечных сдвигов и вертикальной качки;
μ : { φ=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

«рыскание» курс с наблюдениями за экстремальными отклонениями от заданного направления

«вертикальная, «борт»овая и «киль»евая качка - возбуждающаяся под действием гравитационных сил

в «корме», на «миделе» и по «носу» - вертикальные ускорения, нормированные свободным падением с наибольшие - в протоколе отмечаются наибольшие из экстремальных событий, иначе все максимумы

Mоре: — Размеры акватории для вычислительного эксперимента и выбор модели штормового волнения

long wide[Δ|%|м] протяженность и ширина акватории в метрах[м] или относительно длины корабля

wave 0 чистое 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 распределаемыми ячейками

Волна: Зыбь: и Вал: —Характеристики трёх групповых структур штормового трохоидального волнения

length [Δ|м|"] длина относительно корпуса корабля[Δ], в метрах[м] или период во времени["]

height [Δ|%|м] высота относительно обрушающегося гребня[Δ], в процентах от осадки корпуса,

или собственно в метрах в отношении удвоенного трохоидального радиуса [м]

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}, {φ 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

## Результаты опытных мореходных экспериментов

Окончанием конфигурационных записей является любая пустая строка или завершение текстового файла. При использовании инициирующих 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 предопределённых в файле «*Аугога.vil*», можно разместить в рабочей директории произвольный файл с именем цифровой модели и расширением *<\*.vil>*.

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, действующих на момент начала вычислительного эксперимента.

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

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

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

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

⇒  $L$ ,  $B$ ,  $T$  – расчетная длина, ширина и осадка корпуса.  $\Psi$  – дифферент в градусной мере и в сантиметрах разница осадок носом и кормой. Положительная величина – это дифферент с погружением носа и всплытием кормы, при этом корпус раскрашивается со сменой цветов по конструктивной ватерлинии, а новая ватерлиния с учётом дифферента наносится жирной линией по условиям погружения на тихой воде. За скобкой размерностей корпуса приводится величина дополнительного погружения относительно конструктивной осадки. В угловых {скобках} в завершении строки – количество аппроксимирующих точек на ахтерштевне, затем – количество <шпангоутов> и количество – точек форштевня.

⇒  $\delta$  – 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  $h$  [м].

⇒ 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 описания корпуса приводятся факторы демпфирования скоростей  $\mu$  по поступательным  $\{\xi, \eta, \zeta\}$  и угловым  $\{\theta, \psi, \chi\}$  движениям корабля.

Краснознамённый ордена Октябрьской революции крейсер I ранга «Аврора» Тихого океана  
Штормовая мореходность и маневренность корабля  $\leq$  прямой вычислительный эксперимент  $\geq$

**Корабль:** Отр, 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 крутящая 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=0cm } ^6.4 K(a.103<шп[147]>113.Φ)

⇒ { δ=0.51, W=6797.9 m³, S=2565.4 m², F=1428.7 m² }

⇒ 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, узл. курс+рыскание руль Z миделя/волна 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 LM 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 LM 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/c²/g] на миделе {m/g} -0.07 < +0.00 > +0.07

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

В третьем блоке исходной информации расписываются параметры трех групповых структур морского трохоидального волнения. Предлагаемые к использова-

нию три варианта моделирования морского волнения независимы, и формально соответствуют привычным гидрометеограммам – сводкам погоды от бортовых метеопостов. Первыми описываются наиболее крутые групповые структуры волновых гребней под непосредственным действием штормового ветра, условно называемые: «Волна», в которые включается асимметричная поправка для усиления крутизны подветренных склонов волн. Две другие структуры волновой зыби по определению моделируют свободно распространяющиеся пакеты волн, ранее зародившиеся в том же районе плавания названы: «Зыбь», и дополнительное воздействие пологих валов от дальних штормов включаются в моделирование в блоке: «Вал».

В информационных записях приводятся λ [м] – длина и ζ [м] – высота максимального гребня в волновом пакете; безразмерная величина α – отношение заданной высоты волны к максимально возможному – обрушающемуся трохоидальному гребню; $A[^{\circ}]$ – направление движения волнового 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 строчка описания математической модели для проведения вычислительного эксперимента¹³:

- 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 трохоидальный процесс) при использовании регулярных неравномерных сеток с трохоидальным 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 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 √ или «п» – на правый борт:

¹³ Действующая версия комплекса «Augga» отлаживается на трохоидальной математической модели морского волнения. В моделях на разностных схемах временно отключен процесс отражения волн ввиду высокочастотных доплеровских эффектов с нарушениями аппроксимационных критериев у быстродвижущейся обшивки корпуса корабля.

- – \angle_B лево \vee право на борт, и обратный курс за 30 секунд.
- – \angle_P руль лево \vee право полбorta, и обратный курс за 1 минуту.
- – \angle_M 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 помочь перекладкой на борт или полбorta вручную, с помощью изменения заданного курса, с возвратом к исходному по необходимости.

5 – • ζ корпус $\int \pm$ волна – вертикальное смещение, высота волны на миделе;

6 – • ϑ углы бортовой и • ψ – килевой качки в градусах;

7 – в трёх столбцах «корма мидель нос» приводится 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 стоке отпечатывается его длительность с фразой «успешное завершение», также означающей корректное формирование и закрытие текстового файла протокола:

<< 04'06" успешное завершение >>

Краткое заключение

Вычислительные эксперименты с моделированием гидромеханики взаимодействия корабля и штормового океана крайне значимы в обоснованиях ключевых технических решений на ранних этапах проектирования перспективного всепогодного корабля, также как и в последующем синтезе положений морской грамотности с обновлениями наставлений мореплавателям для конкретных типов кораблей, для заданных навигационно-гидрографических и гидрометеорологических условий штормового мореходства.

Прямое численное моделирование также востребуется в оперативной обстановке для экспериментальной поверки навигационных решений бортовыми счётно-решающими приборами, что важно в обеспечение действий корабля по прямому предназначению; для оперативной подготовки оптимальных и безопасных маневров, выбора параметров наилучшей ходкости и/или обитаемости в сложных, штормовых или аварийных условиях кораблевождения на дальних коммуникациях и рыбных промыслах Дальнего Востока России.

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. *Кочин Николай Евграфович, Кибель Илья Афанасьевич, Розе Николай Владимирович*. Теоретическая гидромеханика. М.: Физматгиз, 1959, ч. I, 584 с., ч. II, 728 с.
5. *Семенов-Тян-Шанский Владимир Вениаминович*. Статика и динамика корабля: Плавучесть, остойчивость и спуск на воду. Л.: Судостроение, 1973. – 607 с.
6. *Холодилин Александр Николаевич*. Стабилизация судна на волнении. Л.: Судостроение, 1972. 232 с.
7. *Шебалов Александр Николаевич*. Нелинейная теория волн и волнового сопротивления: Учебное пособие. – Л.: Изд. Ленинградского кораблестроительного института, 1984. 107 с.
8. *Van-Lammeren, Troost, Конинг*. Сопротивление, пропульсивные качества и управляемость судов. Л.: Судпромгиз, 1957. 388 с.
9. 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.
10. *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
11. *Gerstner Franz Joseph*: 1802 “Theorie der Wellen,” Böhmisches Gesellschaft der Wissenschaften, Abhandlungen; 1804 “Theorie der wellen samt einer daraus abgeleiteten Theorie der Deichprofile”. *Теория волн вместе с основанной на ней теорией волновых профилей* (Prague: Gottlieb Haase); sowie 1809 in Annalen der Physik, 32, 412–445.
12. *Храмушин В. Н.* Трехмерная тензорная математика вычислительных экспериментов в гидромеханике. – Владивосток: ДВО РАН 2005. – 212с. shipdesign.ru/Khram/Tensor_Mathematics-2005.pdf
13. *Храмушин В. Н.* Поисковые исследования штормовой мореходности корабля. Lambert Academic Publishing. 2018. – 470 с. shipdesign.ru/Khram/History-III.pdf
14. *Храмушин В. Н.* Гидромеханика крыла и плавника. Lambert Academic Publishing. 2023. – 80 с. shipdesign.ru/Khram/Wings.html
15. *Храмушин В. Н.* Штормовая мореходность корабля. Вычислительный эксперимент в проектных корабельных изысканиях и поверке навигационных наставлений в штормовом плавании. Берлин. Lambert Academic Publishing. 2025. 384 стр. shipdesign.ru/Khram/Aurora.pdf

Программные комплексы и базы данных

- «Контекстная графика» – (Window-Place) Контекстно-зависимая среда построения трехмерной графики OpenGL. СахГУ № 2010615850 от 8 сентября 2010 г.
- «Н и 11» – Построение аналитической формы корпуса корабля, расчеты волнового сопротивления, кривых элементов теоретического чертежа и диаграмм остойчивости морских судов. СахГУ № 2010615849 от 8 сентября 2010 г.
- «Тензор» - Программа для построения числовых объектов и функций трехмерной тензорной математики. СПбГУ № 2013619727 от 14 октября 2013 г.
- «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.

Патенты и заявки на изобретения

«Корабль без килевой качки на ходу на волнении». Храмушин В. Н.

Рег. № 2007133625 от 07.09.2007 г.

«Корабль гидрографической и патрульной службы». Храмушин В. Н. Патент № 2384456 от 20 марта 2010 г.

«Корабль без бортовой качки на волнении». Храмушин В. Н. Патент № 2360827 от 10.07.2009 г.

«Корабль с плавниковым движителем». Храмушин В. Н. Патент № 2360831 от 10.07.2009 г.

«Активный стабилизатор килевой и бортовой качки корабля – штормовой аварийный движитель». Храмушин В. Н. Патент № 2384457 от 20.03.2010 г.

«Корабль, остойчивый в штормовом плавании». Храмушин В. Н. Патент № 2487043 (СахГУ). Бюл. № 2. от 20 января 2013 г.

«Рыболовное судно северных морей». Храмушин В. Н. Патент № 2535382 (СахГУ). Бюл. № 34. от 10 декабря 2014 г.

«Носовая оконечность быстроходного надводного корабля или относительно тихоходного гражданского судна повышенной штормовой мореходности и ледовой проходимости в автономном плавании - Форштевень и скулья корабля (Stem). Храмушин В. Н. Патент № 2607136, Бюл. № 1 от 2017-01-10.

«Кормовая оконечность стабилизированного для штормового плавания корабля - Ахтерштевень и кормовой подзор корабля (Stern). Храмушин В. Н. Патент № 2607135, Бюл. № 1 от 2017-01-10.

«Универсальное транспортное судно» (Univer86). Храмушин В. Н. Патент № 2603709 (СахГУ). от 2016-07-04

«Морской спасатель - научно-исследовательское судно» (A1202). Храмушин В. Н. Патент № 2603818 (СахГУ), от 2016-07-04.

«Каботажное пассажирское судно» (A1205). Храмушин В. Н. Патент № 2653906, бюл. № 14 от 2018-05-15.

«Надводный борт и верхняя палуба корабля» (Deck). Храмушин В. Н. Заявка: № 2016150045 от 2016-12-19.

«Гидродинамическая модель источника штормовых нагонов и экстремальных течений под воздействием подвижного атмосферного тайфуна». Храмушин В. Н. Патент № 2652642, бюл. № 13 от 2018-04-28

«Гидродинамическая модель очага цунами». Храмушин В. Н. Патент № 2652643, бюл. № 13 от 2018-04-28.

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

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

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, Азчерьбыа, 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;

Докторанттура по кафедре проектирования судов, Кораблестроительного факультета Санкт-Петербургского государственного морского технического университета (ЛКИ);

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).

~ ©2025-08-06 ~ Кашип+Сызрань~Калининград~Севастополь~Ленинград~Владивосток~Сахалин~Петрограф~מִלְבָד ~