

Санкт-Петербургский Государственный Университет Информационных  
Технологий, Механики и Оптики

*На правах рукописи*

А.А. Безгодов

ВИРТУАЛЬНЫЙ ПОЛИГОН ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ  
УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Специальность: 05.13.18 — Математическое моделирование, численные  
методы и комплексы программ

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
Доктор технических наук,  
А.В. Бухановский

Санкт-Петербург  
2011

# Оглавление

<b>Введение</b>	<b>4</b>
<b>1 Технология виртуальных полигонов для моделирования сложных технических объектов и систем</b>	<b>9</b>
1.1 Технология виртуальных полигонов . . . . .	10
1.2 Математические модели динамики внешней среды . . . . .	13
1.3 Математические модели динамики морских объектов . . . . .	17
1.3.1 Классификация моделей динамики судов под воздействием внешних возмущений . . . . .	18
1.3.2 Спектральные линейные и линеаризованные модели динамики судна . . . . .	18
1.3.3 Нелинейные асимптотические модели динамики судна	20
1.3.4 Нелинейные численные модели динамики судна, основанные на уравнениях классической механики . . . . .	20
1.3.5 Нелинейные численные модели динамики судна, основанные на уравнениях гидромеханики . . . . .	23
1.4 Технологии визуализации и виртуальной реальности . . . . .	26
1.5 Постановка задачи . . . . .	30
1.6 Выводы по главе 1 . . . . .	31
<b>2 Численное моделирование динамики судна на нерегулярном волнении</b>	<b>32</b>
2.1 Математическая модель нерегулярного волнения . . . . .	33
2.2 Математическая модель динамики судна на нерегулярном волнении . . . . .	38
2.3 Оценка влияния случайного характера сеток на расчет статических и динамических характеристик судна . . . . .	45
2.4 Идентификация модели . . . . .	45
2.5 Выводы по главе 2 . . . . .	50

<b>3 Программно-аппаратный комплекс виртуального полигона</b>	<b>51</b>
3.1 Состав и общая архитектура ПАК . . . . .	52
3.2 Подсистема моделирования . . . . .	57
3.2.1 Сущности и фабрика сущностей . . . . .	57
3.2.2 Lua API виртуального полигона . . . . .	59
3.2.3 Объект «Таймер» . . . . .	60
3.2.4 Объект «Корабль» . . . . .	63
3.2.5 Типовой статический эксперимент: построение ДСО, определение метацентрической высоты. . . . .	66
3.2.6 Типовой динамический эксперимент: качка на тихой воде. . . . .	67
3.3 Графическая подсистема . . . . .	69
3.3.1 Общая структура графической подсистемы . . . . .	69
3.3.2 Морфологическое слаживание ступенчатости изображения . . . . .	71
3.3.3 Технология отображения морского волнения . . . . .	73
3.3.4 Расчет поля волнения с использованием CUDA . . . . .	77
3.4 Развертывание виртуального полигона на инфраструктуре ЦСМВ СПбГУ ИТМО . . . . .	78
3.5 Выводы по главе 3 . . . . .	79
<b>4 Применение виртуального полигона для воспроизведения экстремальных ситуаций</b>	<b>84</b>
4.1 Режим основного резонанса . . . . .	85
4.1.1 Цель и постановка эксперимента . . . . .	85
4.1.2 Анализ результатов эксперимента . . . . .	86
4.2 Режим параметрического резонанса лагом к волне . . . . .	92
4.2.1 Цель и постановка эксперимента . . . . .	92
4.2.2 Анализ результатов эксперимента . . . . .	93
4.3 Режим параметрического резонанса на встречном волнении	97
4.3.1 Цель и постановка эксперимента . . . . .	97
4.3.2 Анализ результатов эксперимента . . . . .	98
4.4 Режим брочинга . . . . .	105
4.4.1 Цель и постановка эксперимента . . . . .	105
4.4.2 Анализ результатов эксперимента . . . . .	106
4.5 Выводы по главе 4 . . . . .	107
<b>Заключение</b>	<b>117</b>
<b>Литература</b>	<b>118</b>

# Введение

Возможности изучения поведения сложных технических систем в экстремальных ситуациях экспериментальными методами существенно ограничены. Потому в настоящее время для этих целей активно применяется компьютерный эксперимент в реальном времени. Для интерпретации его результатов привлекаются технологии виртуальной реальности (ВР), обеспечивающие «погружение» исследователя в моделируемое явление с возможностью всестороннего наблюдения и анализа воспроизводимых закономерностей реального мира. В свою очередь, это стимулирует развитие нового класса проблемно-ориентированных программных комплексов для проведения вычислительного эксперимента — *виртуальных полигонов* (ВП) для поддержки принятия решений в различных областях науки и промышленности [98]. Процесс проектирования и разработки ВП требует совокупного учета особенностей методов компьютерного моделирования в конкретной предметной области и соответствующих возможностей технологий ВР, включая специфику аппаратной реализации. Это достигается путем адаптации математических моделей для формирования предметно-зависимых визуальных динамических сцен с высоким уровнем реалистичности и достоверности. В отечественной науке существенный вклад в развитие теоретических основ и практических решений в области технологий виртуальных полигонов внесен научными школами С.В. Клименко, Н.Н. Шаброва, М.В. Яковского, Ю.М. Баяковского, М.В. Михайлова, и ряда других исследователей.

Технологии ВП наиболее востребованы в направлениях, где проведение полномасштабных экспериментов экономически невыгодно или связано с существенными рисками. К таким областям, в частности, относится проектирование судов и технических средств освоения океана с повышенными требованиями к безопасности мореплавания, что требует изучения их поведения в разного рода аварийных ситуациях. Несмотря на то, что развитие аварийной ситуации является сложным многовариантным процессом, ретроспективный анализ известных инцидентов

позволяет выделить условия, способствующие их возникновению, например, параметрические резонансы разной природы, потеря управляемости на гребне волны, захват судна волной (брочинг). В свою очередь, развитие каждой из вышеперечисленных ситуаций может усложняться за счет внутренних факторов (смещение навалочного груза, затопление отсеков, интенсивное обледенение и пр.). Как следствие, разнообразие и неоднозначность влияния экстремальных условий эксплуатации ограничивает возможности постановки экспериментов в опытных бассейнах, и требует развития соответствующих проблемно-ориентированных программных комплексов на основе технологии ВП, что и определяет актуальность темы диссертации.

**Предметом исследования** является технология создания ВП применительно к задачам исследовательского проектирования морских объектов (МО) — судов и средств освоения океана.

**Целью работы** является развитие методов формирования предметно-ориентированных динамических сцен на основе компьютерного моделирования экстремальной динамики МО под воздействием нерегулярных внешних возмущений и разработка на их основе соответствующего математического и программного обеспечения ВП.

**Задачи исследования.** Достижение поставленной цели подразумевает решение следующих задач:

- Анализ существующих математических моделей поведения МО в экстремальных условиях эксплуатации, исходя из их применимости для формирования динамических сцен в ВП.
- Разработка метода численного моделирования экстремальной динамики МО с шестью степенями свободы на нерегулярном трехмерном волнении с адаптацией к специфике использования в составе ВП, его алгоритмическая и программная реализация.
- Разработка метода формирования динамических сцен с на основе численного моделирования динамики внешней среды и МО, и его адаптация для широкоэкраных систем ВР.
- Проектирование, разработка и отладка программного комплекса ВП, его развертывание на аппаратной инфраструктуре Центра ситуационного моделирования и визуализации (ЦСМВ СПбГУ ИТМО)<sup>1</sup>.
- Апробация ВП для проведения компьютерных экспериментов по исследованию экстремальной динамики МО в режиме основного и

---

<sup>1</sup>ЦСМВ — центр коллективного пользования СПбГУ ИТМО

параметрического резонансов, а также в условиях броунинга<sup>2</sup>.

**Методы исследования** включают в себя методы вычислительной гидромеханики, теории вероятностей, математической статистики и имитационного моделирования, анализа алгоритмов и программ, обработки изображений и научной визуализации.

**Научную новизну** результатов работы определяют:

- Использование метода прямого моделирования динамики МО с шестью степенями свободы в нелинейной постановке, позволяющего унифицировать проведение компьютерного эксперимента для различных классов экстремальных явлений с возможностью интерактивного управления средствами ВП.
- Формирование реалистичных динамических сцен за счет применения метода численного интегрирования уравнений динамики МО на основе случайных сеток, обеспечивающих компенсацию ошибки вычислений и балансировку вычислительной нагрузки в условиях реального времени.

**Практическую ценность** работы составляют:

- Комплект программной и эксплуатационной документации на программную систему для моделирования и визуализации динамики МО в экстремальных условиях эксплуатации<sup>3</sup>.
- Программно-аппаратный комплекс ВП ShipX-DS, функционирующий на базе ЦСМВ СПбГУ ИТМО.

**На защиту выносятся:**

- Метод формирования визуальных динамических сцен на основе численного моделирования нелинейной динамики МО с шестью степенями свободы на нерегулярном трехмерном волнении.
- Архитектура программного комплекса ВП для исследования МО в экстремальных условиях эксплуатации с поддержкой аппаратных возможностей ширококоэкранных систем ВР.

---

<sup>2</sup>Неуправляемый разворот судна вследствие «захвата» волной, сопровождаемый сильным динамическим креном

<sup>3</sup>Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2011611381 — 2011

**Достоверность научных результатов и выводов** обеспечивается строгостью наложенных ограничений предметной области, валидацией результатов моделирования путем сопоставления с классическими моделями корабельной гидродинамики, исследовательскими испытаниями работоспособности программно-аппаратного комплекса ВП на инфраструктуре ЦСМВ СПбГУ ИТМО, а также воспроизводимостью ряда нелинейных эффектов экстремальной динамики судна в ходе компьютерного эксперимента.

**Внедрение результатов работы.** Результаты работы нашли свое применение при выполнении проектов «Интеллектуальная система навигации и управления морским динамическим объектом в экстремальных условиях эксплуатации», «Интеллектуальные технологии поддержки процессов исследовательского проектирования судов и технических средств освоения океана», «Высокопроизводительный программный комплекс моделирования динамики корабля в экстремальных условиях эксплуатации», «Инструментальная технологическая среда для создания распределенных интеллектуальных систем управления сложными динамическими объектами» в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы, «Распределенные экстренные вычисления для поддержки принятия решений в критических ситуациях» в рамках реализации постановления Правительства РФ № 220 «О мерах по привлечению ведущих учёных в российские образовательные учреждения высшего профессионального образования», «Создание распределенной вычислительной среды на базе облачной архитектуры для построения и эксплуатации высокопроизводительных композитных приложений» в рамках реализации постановления Правительства РФ № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства». Результаты работ внедрены в производственную деятельность ЗАО «Фирма "АйТи". Информационные технологии».

**Апробация работы.** Изложенные в диссертации результаты обсуждались на восьми международных и всероссийских научных конференциях, семинарах и совещаниях, включая Всероссийскую научно-техническую конференцию «Интеллектуальные и информационные системы» (2009 г., Тула); IX и X ежегодные Международные конференции «Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах» (2009 г., Владимир; 2010 г., Пермь); XVII Всероссийскую научно-методическую конференцию «Телематика 2010» (2010 г., Санкт-Петербург); V, VII Межвузовские конференции молодых ученых (2008 г., 2010 г., Санкт-Петербург); Всероссийскую конференцию «Технологии Microsoft в теории и практи-

ке программирования» (2010 г., Нижний Новгород), IV Международную конференцию по информатике MEDIAS (2011 г., Лимасол, Кипр).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ (из них 4 — в изданиях из перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК РФ).

## **Глава 1**

**Технология виртуальных  
полигонов для моделирования  
сложных технических объектов  
и систем**

## 1.1 Технология виртуальных полигонов

Специфика исследовательского проектирования морских объектов состоит в неопределенности и неполноте информации об их поведении в экстремальных ситуациях, совокупно вызванных воздействием внешней среды, инициируемых им внешних (например, интенсивное обледенение) и внутренних дестабилизирующих факторов (смещение груза, затопление отсеков и пр.). При этом развитие аварийной ситуации происходит по различным сценариям, которые не могут быть в общем случае сведены к ограниченному набору типовых случаев. Однако ретроспективный анализ гибели судов позволяет выделить условия, способствующие возникновению аварийных ситуаций. При движении судна лагом к волне выделяют такие ситуации, как воздействие на судно ветрового шквала в условиях сильной качки, потеря остойчивости по причине затопления палубного колодца, а также ударное воздействие гребня разрушающейся волны. Напротив, при попутном волнении начинают играть роль совершенно другие критические факторы, а именно: параметрический резонанс бортовых колебаний, потеря управляемости на гребне волны, захват судна волной (брочинг). В свою очередь, развитие каждой из вышеперечисленных ситуаций может усложняться за счет внутренних факторов (смещение навалочного груза, затопление отсеков, интенсивное обледенение и пр.). Неоднозначность условий, приводящих к возникновению аварийных ситуаций, в данном случае затрудняет обоснование оптимальных проектных характеристик судна формальными методами и приводит к необходимости использования методов виртуального моделирования. Иными словами, основным инструментом поддержки принятия решений в процессе исследовательского проектирования становятся численные модели динамики морских объектов, позволяющие количественно воспроизвести их поведение под воздействием реалистичных внешних возмущений [3].

Таким образом, единственным способом моделирования рассматриваемых ситуаций является программное численное моделирование. В связи с этим вводится понятие виртуального полигона (Virtual test bed). Виртуальный полигон — это программно-аппаратное средство, которое поддерживает виртуальное проектирование, анализ и прототипирование различных систем [33] [53].

Виртуальные полигоны — понятие достаточно широкое, поэтому взгляды разработчиков на архитектуры систем могут сильно различаться. Так например, ключевыми особенностями системы для задач анализа корабельных электрических систем [33] являются: поддержка моделей, написанных на различных языках программирования; система визуализации,

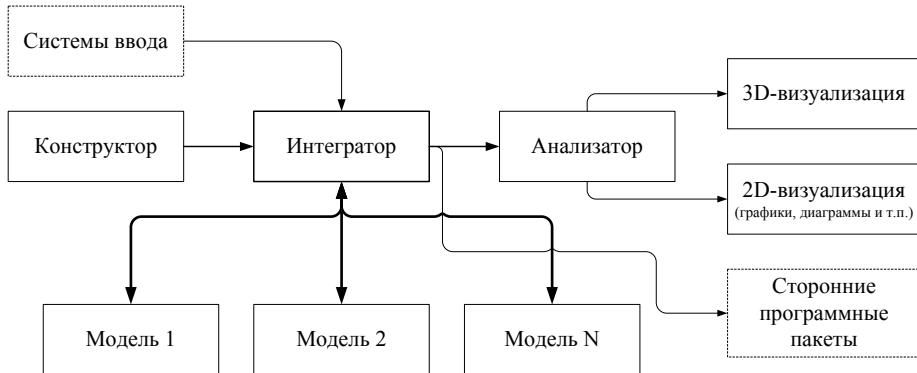


Рис. 1.1: Обобщенная схема виртуального полигона

включающая анимацию в реальном времени и построение графиков; отчуждение пользовательских знаний.

Другая система, разрабатываемая в NASA для задач запуска суборбитальных аппаратов [53], представляет собой web окружение, основной задачей которого является объединение в общей сложности 44 категорий моделей, каждая из которых реализует свои отдельные, сравнительно простые задачи, в единую распределенную систему.

Анализ задач моделирования динамики судна [3], а также виртуальных полигонов, использующихся в других научных и инженерных областях показал, что основной частью виртуального полигона является интегрирующая различные модели подсистема (интегратор). Также в состав виртуального полигона может входить некоторый «конструктор» для формирования объектов и средство анализа. Конструирование объектов может осуществляться как посредством ввода команд, задающих параметры новых объектов, так и с использованием развитых WYSIWYG-редакторов. Средство анализа результатов моделирования может представлять собой как простой построитель графиков по данным, так и сложные системы 3D-визуализации. Компоненты виртуального полигона могут быть как локальными (собранными в одно приложение и развернутым на ПК оператора), так и распределенными (развернутыми на нескольких серверах, со множеством клиентов).

Обобщенная схема виртуального полигона показана на рис. 1.1.

Как было уже отмечено выше, центральной частью виртуального полигона является подсистема моделирования (локальная или распреде-

ленная). В основе подсистем моделирования применительно к задачам экстремальной динамики судна лежат модели внешней среды (нерегулярное морское волнение) и модель поведения судна.

Выбор комплекса моделей, с одной стороны, должен отвечать требованиям задачи, которую необходимо решить, с другой стороны, требованиям по вычислительным трудозатратам. В свою очередь комплекс моделей определяет способы взаимодействия между ними, а также форматы входных и выходных данных.

## 1.2 Математические модели динамики внешней среды

Основная задача математического моделирования динамики судна связана с обеспечением устойчивости его движения и формулируется как определение области в пространстве состояний судна, соответствующей требованиям эксплуатации, поиск границы этой области и связь параметров судна с критическими значениями параметров действующих возмущений [20]. Исследование в такой постановке может быть выполнено только на основе анализа движения судна, находящегося под действием вызванных ветром и волнением сил. По этой причине для решения задачи построения модели динамики судна под воздействием внешней среды в экстремальных условиях эксплуатации необходимо разделить собственно математические (имитационные) модели изменчивости внешней среды и модели динамики морского объекта, находящегося в ней.

Непрерывный рост численности судов мирового флота, а также бурное освоение шельфовой зоны требуют не только умения предсказывать неблагоприятные погодные условия с той или иной заблаговременностью, но и определять количественные характеристики морских явлений редкой повторяемости, характеризующих экстремальную динамику внешней среды. К ним относятся скорость ветра, морское волнение, течения и уровень моря, а также их сочетания, возможные один раз в 100 или даже 1000 лет. Современная концепция получения информации о состоянии Мирового океана предполагает модельный подход на базе гидродинамического и статистического моделирования ветра, волнения, течений и уровня моря [1].

В инженерной практике экстремальные гидрометеорологические явления характеризуются расчетными сочетаниями скоростей ветра, параметров волнения, скоростей течений и уровня моря, возможными 1 раз в  $T$  лет, где  $T$  соответствует классу сооружения. Современная концепция получения информации об экстремальных гидрометеорологических явлениях основана на синтетическом подходе: на основе упорядоченных массивов метеорологической информации за несколько десятков лет выполняется гидродинамическое моделирование полей течений, морского волнения и уровня моря. Эти данные используются для идентификации стохастической модели, на основе которой выполняется экстраполяция расчетных характеристик на период повторяемости  $T$ .

В рамках концепции [11] основным источником данных об океанографических процессах (волнении, уровне, течениях) является сертифицированная (или, в метрологической практике – аттестованная) гидро-

динамическая модель динамики океана. По ней выполняются расчеты за непрерывный исторический период, обеспеченный данными наблюдений за атмосферными процессами (давлением, ветром и температурой воздуха). Гидродинамическая модель может быть интерпретирована как виртуальная измерительная система, верифицированная на основе разрозненных данных измерений, уже имеющихся в данном районе Мирового океана. Такой подход позволяет, используя данные реанализа метеорологических полей, получать информационные массивы океанографических характеристик непрерывной продолжительностью несколько десятков лет [5]. Для статистического оценивания экстремальных характеристик, возникающих с определенной вероятностью, используется система стохастических моделей, описывающих совместную многомасштабную изменчивость пространственно-временных полей океанографических характеристик. Это дает возможность методом Монте-Карло воспроизвести ансамбль их реализаций, таким образом экстраполируя значения экстремумов на заданный временной интервал.

Следует отметить, что экстремальность гидрометеорологического явления по отношению к конкретному объекту определяется интегральной совокупностью всех факторов путем рассмотрения функций риска, специфичных для определенных классов морских объектов и сооружений. Это позволяет интерпретировать экстремальные гидрометеорологические явления не только в терминах скалярных характеристик (высоты волны, периода и пр.), а непосредственно в рамках формализма многомерных экстремумов.

Для имитационного моделирования конкретных воздействий на морские объекты и сооружения применяется иерархия моделей, позволяющая адекватно учесть многомасштабную изменчивость, обусловленную прохождением штормов. Так, для воспроизведения полей волнения в мелкомасштабном (секунды–часы) диапазоне изменчивости конкурентно (в зависимости от формы спектра) используются модели в форме полевой авторегрессии [8] или в форме ортогональных разложений со случайными коэффициентами [18], в том числе с учетом нелинейности волнового профиля [40]. Учет штормовой активности, в свою очередь, в диапазоне синоптической изменчивости осуществляется двумя альтернативными путями – посредством модели авторегрессии-скользящего среднего [17] в синоптическом диапазоне (в терминах характерной высоты волны) или в терминах импульсной модели пространственно-временного поля в рамках лагранжева формализма [76]. Учет климатической неоднородности, в свою очередь, требует применения другого класса моделей на основе ортогональных разложений по каноническому базису (естественные ортогональные функции) [75].

Для стохастического моделирования полей морского волнения может использоваться модель, основанная на использовании процессов авторегрессии-скользящего среднего [94] в фиксированной точке пространства. Эта модель основывается на представлении процесса волнения как решения линейного дифференциального уравнения N-го порядка с постоянными коэффициентами и случайным входным сигналом.

Модель авторегрессии-скользящего среднего при высоком порядке по каждой из координат в рамках корреляционной теории является эквивалентной другой форме записи пространственно-временного случайного гауссова поля — линейной модели Лонге-Хиггинса [13], которое является формой разложения в дискретный ряд Фурье [95].

Для идентификации параметров моделей волнения необходимо знать корреляционную функцию или функцию спектральной плотности волновой поверхности. Спектральная плотность (или просто спектр) отражает свойства поля волнения при неизменных внешних факторах, как квазистационарного и квазиоднородного процесса. Изменения условий волнообразования связаны с прохождением барических образований (синоптическая изменчивость), годовой ритмикой (сезонная изменчивость) и долгопериодными вариациями циркуляционных процессов (межгодовая изменчивость), что позволяет определить волновой климат (или режим волнения) как ансамбль состояний волновой поверхности с учетом указанной изменчивости и описать его в терминах режимных статистических характеристик. Набор параметров из ансамбля промежутков квазистационарности характеризует волновой климат [5].

В целом волновой климат описывается ансамблем реализаций спектров за временной интервал, характеризуемый обычно несколькими десятками лет, в каждой точке акватории. В силу такого подхода в качестве отдельных сценариев состояний моря выступают так называемые климатические спектры. Климатический спектр — это конкретный спектр, имеющий определенную вероятность (повторяемость появления в климатическом ансамбле) и отражающий ситуации, характерные для некоторого набора условий волнообразования [5]. Для определения климатических спектров заданной повторяемости используются методы класса Монте-Карло [40] или более сложные методы на основе многопараметрической оптимизации [30].

Для отдельных задач моделирования внешних воздействий в режиме мелкомасштабной изменчивости используются физико-статистические методы. В частности, это связано с ситуациями, когда гидродинамические характеристики отдельной волны имеют определяющее влияние на объект, а априори восстановить ее профиль не представляется возможным. Такой подход характерен для моделирования волн-убийц и их воздей-

ствия на морские объекты и сооружения [56][46]. Однако его применение далеко не всегда оправдано в силу ресурсоемкости вычислений.

Таким образом, рассмотренные модели позволяют воспроизводить изменчивость внешних возмущений, действующих на морской объект, в соответствии с их климатической повторяемостью для характерного района Мирового океана. Это дает возможность их использования в качестве входных данных для моделирования динамики морских объектов.

## **1.3 Математические модели динамики морских объектов**

Основной целью изучения динамики судна под воздействием внешних условий является обеспечение судна качествами, в наилучшей степени обеспечивающими его использование по назначению. Центральное место среди них занимают мореходные качества судна, под которыми понимают совокупность свойств, определяющих поведение корабля как плавающего сооружения в целом в различных условиях эксплуатации и при различных внешних воздействиях (в том числе экстремальных). Построение и анализ моделей динамики судна направлены в первую очередь на выявлении и изучение объективных закономерностей, описывающих взаимодействие корабля с внешней средой, которые в одинаковой мере присущи мореходным качествам всех кораблей независимо от их индивидуальных различий. Знание этих закономерностей (особенно в форме хорошо апробированных методик и моделей) дает возможность предвидеть поведение корабля в различных условиях, а также указать те предупредительные меры, которые нужно предпринять, для исключения гибельных для корабля последствий, что имеет большое значение, как для кораблестроителей, так и мореплавателей. С точки зрения постройки судов наличие моделей, обеспечивающих качественные оценки поведения судна под воздействием внешней среды (в том числе и экстремальных ситуаций) в зависимости от его размеров, формы корпуса, распределения грузов и т.п., предоставляет возможность обеспечить кораблю надлежащие мореходные качества еще на этапе проектирования.

В зависимости от решаемых задач модели динамики судна могут описывать поведение судна на спокойной воде без анализа его движения при переходе из одного положения в другое (статическое рассмотрение различных положений корабля), а также непосредственно при движении. Такая классификация, как правило, определяет порядок проведения исследований. Несмотря на существенный прогресс в решении данных задач, достигнутый в последние десятилетия, заключающийся в широкой замене экспериментальных исследований в опытных бассейнах компьютерным экспериментом, требуется систематическое изучение имеющихся моделей динамики судов под воздействием внешней среды (особенно применительно к новым типам судов), а также создание единой методологической основы для применения этих моделей.

В данном разделе рассматриваются существующие тенденции в области подходов, методов и моделей динамики корабля при взаимодействии с внешней средой, в том числе в сложных (экстремальных) условиях

эксплуатации, а также моделирование внешних условий (ветра и волнения) эксплуатации морских динамических объектов. Основной акцент сделан на модели плавучести, остойчивости, непотопляемости и качки судов. Вопросы, касающиеся прочности корабля, тесно связанные с определением действующих на судно сил, относятся к строительной механике корабля и в данном отчете не рассматриваются. Все качества судов, рассматриваемые в данном отчете, изучаются в предположении, что судно обладает достаточной прочностью, что позволяет рассматривать его как абсолютно твердое тело.

### **1.3.1 Классификация моделей динамики судов под воздействием внешних возмущений**

Качественное исследование динамики судна под воздействием внешней среды подразумевает построение рациональных математических моделей качки, позволяющих, с одной стороны, достаточно точно отразить гидродинамические факторы, которые определяют действие волнующейся жидкости на морской объект, а с другой — выявить возможные в условиях эксплуатации режимы качки, представляющие реальную угрозу безопасности плавания. Построение таких моделей не является изолированной задачей, так как при их создании необходимо решение множества других задач, связанных с плавучестью, определением диаграммы статической и динамической остойчивости и т.п. В настоящее время можно выделить четыре категории моделей динамики морских объектов:

- Спектральные линейные и линеаризованные модели динамики судна.
- Нелинейные асимптотические модели динамики судна.
- Нелинейные численные модели динамики судна, основанные на уравнениях классической механики.
- Нелинейные численные модели динамики судна, основанные на уравнениях гидромеханики.

### **1.3.2 Спектральные линейные и линеаризованные модели динамики судна**

Спектральные линейные и линеаризованные модели динамики судна начали активно развиваться в 60-е годы XX века в связи с накоплением знаний о спектральной структуре морского волнения. Данные модели

основаны на допущении, что жидкость идеальна, ее волновое движение безвихревое (потенциальное), а амплитуды волн достаточно малы. Эти решения позволяют пренебречь квадратами вызванных скоростей и отыскать решение в рамках линейной теории. Чтобы использовать полученные результаты при определении сил и моментов, действующих на судно со стороны волнующейся жидкости, делается предположение, что и перемещения судна, вызванные волнением малой амплитуды, также малы.

Основными предпосылками линейной гидродинамической теории качки является относительная малость амплитуд набегающих волн и перемещений судна. Гидродинамическая теория учитывает не только воздействие волн на судно, но и определяет возмущения, вносимые судном в поле давлений волнующейся жидкости. В силу малости амплитуд набегающих волн волновое движение, обусловленное колебаниями судна, может быть представлено как при качке на тихой воде. Малость перемещений судна позволяет рассматривать дифрагированное волновое движение как дифракцию волн на неподвижном препятствии.

Предпосылки линейной гидродинамической теории качки непосредственно следуют из возможности представления действующих сил многомерными рядами Тейлора по динамическим координатам (перемещениям и скоростям) в окрестности положения равновесия судна на тихой воде. Затем удерживаются только первые члены, содержащие перемещения и скорости судна в степени не выше первой. Поскольку коэффициенты разложений определяются при значениях перемещений и скоростей судна в положении равновесия, то это и позволяет рассматривать силовое воздействие, обусловленное качкой, как таковое при колебаниях на тихой воде. Соответствующим образом определяется и силовое воздействие, обусловленное набегающими волнами.

Основные предпосылки линейной гидродинамической теории качки позволяют решать независимо друг от друга задачи об определении характеристик набегающих на судно волн, дифрагировании волнового движения, возмущенного движения жидкости, обусловленного вынужденными колебаниями судна на тихой воде. При этом используется принцип суперпозиции, согласно которому результирующее волновое движение определяется как сумма указанных волновых движений.

В настоящее время эти модели лежат в основе ряда нормативных документов и методик, например [23][14]. В ряде случаев их можно обобщить и на случай линеаризованных моделей качки [20]. Однако в силу предположений об относительно малой амплитуде набегающих волн и перемещений судна данные модели не применимы для исследования динамики судна в экстремальных ситуациях.

### **1.3.3 Нелинейные асимптотические модели динамики судна**

В том случае, если динамика судна описывается классическими уравнениями механики, для ряда нелинейных систем в отдельных случаях можно строить их решения на основе асимптотических (аналитических) методов. Для получения аналитического решения в постановку задачи в форме уравнений механики вносятся определенные допущения: линеаризация основных уравнений и граничных условий по малому параметру — числу Фруда, приближенный учет вертикальных и продольных угловых колебаний судна и т.п. [10]. В работе [19] приведен пример аналитического решения системы дифференциальных уравнений качки одним из модификаций метода малого параметра. Однако такой подход имеет ограниченную применимость и может привести к потере новых решений, форма которых неизвестна заранее. Поэтому целесообразно использовать численные методы отыскания решений системы дифференциальных уравнений качки и оценки их устойчивости. Однако сложность таких решений может привести к большим затруднениям в правильной трактовке получаемых результатов: многообразие нелинейных факторов, которые учитываются общей математической моделью качки, в ряде случаев не позволяет выявить первопричину возникновения необычных колебаний или потерю их устойчивости. Чтобы осуществить это, допустимо, наряду с общей моделью, воспользоваться некоторыми частными математическими моделями качки, учитывающими лишь часть нелинейных факторов и взаимосвязей между различными видами качки, влияние которых может быть изучено также аналитическими и экспериментальными методами. Несмотря на то, что для регулярного волнения этот подход позволяет в целом получать достаточно полную информацию о структуре нелинейных колебаний [19], прямой перенос его на область нерегулярных колебаний, например, представляя волновое возмущение в форме неканонического разложения, заставляет ограничиться рамками корреляционной теории [26], несмотря на очевидную негауссовость результирующего распределения. По этой причине в настоящее время подобные методы в основном носят качественный (прикидочный) характер и не используются для решения задач имитационного моделирования.

### **1.3.4 Нелинейные численные модели динамики судна, основанные на уравнениях классической механики**

Многие важные задачи мореходности, интересные как в научном, так и в практическом отношении, не поддаются исследованию хорошо разработанными методами линейной теории. К задачам, полноценное решение которых требует применения нелинейных методов, то есть учета конечности амплитуд качки, в первую очередь относятся:

- Определение максимальной амплитуды бортовой качки в связи с обеспечением безопасности плавания.
- Расчет характеристик бортовой качки судов с очень малой метацентрической высотой.
- Исследование бортовой качки аварийного судна с отрицательной начальной остойчивостью.
- Расчет характеристик качки низкобортных судов.
- Оценка интенсивной заливаемости и оголения днища при качке на волнении.
- Расчет сопротивления воды движению судов на волнении.
- Исследование вопросов взаимного влияния отдельных видов продольной и поперечной качки судов.

Большинство перечисленных задач тесно связано с обеспечением безопасности судна в неблагоприятных условиях плавания, когда амплитуды качки близки к максимальным. Однако нелинейная теория охватывает не только вопросы интенсивной качки, но и любые другие задачи, требующие учета взаимного влияния различных гидромеханических факторов, которые в рамках линейной теории рассматриваются как независимые. В гидромеханической части задача нелинейной качки судов на регулярном и нерегулярном волнении решается следующим образом. В начале на базе приближенной гидромеханической теории качки конечной амплитуды составляют дифференциальные уравнения качки судна как твердого тела с шестью степенями свободы, движущегося с постоянной скоростью хода под произвольным курсовым углом к прогрессивным волнам относительно малой амплитуды, с такой степенью точности, определяемой малыми параметрами задачи, которая позволяет учесть

все известные режимы нелинейной бортовой качки, включая субгармонические и хаотические. Это приводит системе связанных нелинейных неоднородных обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка, которые позволяют моделировать колебания морских судов на регулярном и нерегулярном волнении. Частные математические модели позволяют совместно исследовать поперечно-горизонтальные, вертикальные и бортовые колебания морских судов и других морских объектов, вводить вязкостные силы, экспериментировать с моделями нерегулярного морского волнения и т.д.

Использование численных методов позволило экстенсивным путем разрешить проблему исследования существенно нелинейных режимов качки, что привело к интенсивному развитию целого семейства моделей и соответствующих им программных реализаций: от иллюстрационных [6][27] на основе изолированных уравнений с постоянными коэффициентами, до достаточно детализированных, с переменными коэффициентами, которые рассчитываются непосредственно в процессе моделирования путем интегрирования по корпусу в рамках текущей ватерлинии в каждый момент времени [4].

Основные требования к моделям нелинейной качки судов заключаются в следующем:

- Даже при современном, весьма высоком уровне развития компьютерной техники нельзя чересчур усложнять общую задачу теории качки судов на волнении, иначе принципиальные трудности решения нелинейной граничной задачи по определению гидродинамических сил будут накладываться на трудности анализа кинематики движения судна, связанные с неустойчивыми режимами колебаний, хаотическими и другими, возможно, неучтеными эффектами.
- Для составления системы дифференциальных уравнений качки судна на волнении необходимо базироваться на такой гидродинамической модели процесса, которая без излишнего усложнения модели, позволила бы учесть все нелинейные факторы, которые могут хотя бы в принципе повлиять на устойчивость колебаний судна, в особенности на потерю остойчивости, приводящую к опасным ситуациям в морских условиях.

Отдельный интерес представляют продольно-горизонтальные колебания, которые могут привести к явлению «захвата» судна волной с последующим поворотом его лагом к волнению (брочинг). Однако в рамках большинства моделей, которые целесообразно использовать для анализа нелинейных бортовых колебаний, явление брочинга описать невозможно.

Для изучения таких явлений строятся специальные модели. Так, например, в работе [74][9] предложены независимые модели движения судна на попутном волнении и специальная модель бортовой качки, разработанная специально для изучения брочинга.

Нелинейные модели качки и их модификации широко применяются в качестве базовых моделей при исследованиях динамики жидкого груза внутри судна [67][68], для исследования эффективности успокоителей качки и разработки алгоритмов их управления [78][73][28], для исследования эффекта параметрического резонанса [83].

Особых подходов требует исследование взаимодействия судна с аномальной волной [2]. Понятие “аномальные волны” получило в англоязычной литературе название “freak waves”, “rogue waves” или даже “killer waves”. Под аномальной волной понимают внезапно возникающую интенсивную волну, которая намного (в два и более раза) превосходит высоту фонового волнения. Помимо большого числа вопросов, которые возникают при оценке динамики судна при взаимодействии с аномальной волной с точки зрения моделирования, не менее острым остается вопрос физических основ возникновения таких волн и способов их математического описания [69].

### **1.3.5 Нелинейные численные модели динамики судна, основанные на уравнениях гидромеханики**

Подход к моделированию динамики судна, основанный на уравнениях классической механики, не учитывает влияния присутствия и движения корабля на распределение гидродинамического давления в волнующейся жидкости, что не позволяет получить полное описание процесса качки и позволяет учесть лишь гидростатические силы и главную часть возмущающих сил. Гидродинамические инерционные и демпфирующие силы и дифракционные составляющие возмущающей силы остаются неучтеными; отчасти это корректируется введением соответствующих «виртуальных» членов (например, присоединенных масс и моментов). Для корректного учета этих составляющих «из первых принципов» необходимы модели динамики судна, основанные на уравнениях гидромеханики, которые позволяют решать задачи о движении качающегося корабля комплексно с учетом влияния корабля и жидкой среды как единой взаимодействующей системы. Данный подход является, по-видимому, наиболее адекватным с точки зрения воспроизведения динамики судна на морском волнении. Это положение связано с корректностью постановки задачи непосредственно в терминах уравнений гидромеханики, что позволяет

не ограничиваться упрощенными параметризациями, характерными для уравнений классической механики. Однако такого рода модели не лишены недостатков, которые во многих случаях связаны с допущениями об идеальности жидкости, отсутствием вязкости и т.п., а также высокой вычислительной сложностью самих моделей. Гидромеханические модели можно эффективно применять для решения практически любых задач, связанных с движением судна, в том числе и специфических задач экстремальной динамики судна, моделирования качки поврежденного судна со свободными поверхностями в отсеках и т.п. [63][34].

Особые успехи применения гидродинамических моделей для решения задач динамики корабля можно отметить в последнее десятилетие, что связано во многом с развитием вычислительной техники, особенно технологий высокопроизводительных вычислений. Интересные результаты были получены в рамках проекта Министерства обороны США [54] по применению моделей, основанных на уравнении Рейнольдса (уравнения Навье-Стокса, осредненные по Рейнольдсу) к описанию движения судна под действием волн. В проекте использовались два пакета программ: UNCLE [25], разработанный Университете Миссисипи, и CFDShip-IOWA [51], разработанный в Университете Айова. Главная задача проекта состояла в предсказании поведения сложных геометрических объектов корабельной формы на воде. В результате были получены качественные модели, предсказывающие характеристики полей поверхностного давления и профиля свободной поверхности. Были также улучшены методы расчета свободной поверхности, вызванные поворотами судового руля. Интересные результаты по моделированию продольной и вертикальной качки корабля методами вычислительной гидродинамики были получены в работе [88].

Достаточно популярны пакетом гидродинамического моделирования для корабельных задач является LAMP (Large Amplitude Motion Program), который представляет собой пакет 3D-моделирования течений жидкости и решения проблемы взаимодействия твердого тела с волнами, в который также включены модели систем управления, заливаемости палубы, учет сил вязкости и другие эффекты. Пакет LAMP широко используется для решения задач нелинейной качки, параметрического резонанса и других. Детальное описание пакета LAMP и его приложений можно найти в [55][71].

В настоящее время такие гидродинамические модели для решения корабельных задач можно реализовать не только посредством специализированных программных систем, но и с помощью пакетов расчета динамики сплошных сред общего назначения, таких, например, как Fluent (здесь можно отметить и отечественную разработку Flow Vision [43]).

Однако в последнем случае принципиальный аспект состоит в том, как корректно задать граничные условия на поверхности, учитывая физико-статистические свойства морского волнения [42].

Отдельный класс пакетов для гидродинамического моделирования задач корабельной гидромеханики представляют собой численные реализации моделей взаимодействия жидкости и твердого тела в условиях волнения (numerical wave tank [43][7][90][81]). Данные модели и реализующие их пакеты позволяют решать широкий класс задач, связанных с динамикой судов на волнении, в некоторых случаях позволяя получать результаты, сопоставимые по точности с экспериментами в опытных бассейнах. Основной подход заключается в решении в расчетной области двух- или трехмерного уравнения Навье-Стокса с обновлением на каждом шаге граничных условий, вызванных наличием твердого тела и свободной поверхности.

Другим методом моделирования взаимодействия судна и жидкости может служить гидродинамика сглаженных частиц (Smoothed particle hydrodynamics) [60]. Метод сглаженных частиц является методом решения задач динамики жидкостей и твердых тел [89]. Метод сглаженных частиц, помимо моделирования динамики морских объектов, позволяет решать задачи моделирования ударных волн [52], разрушающихся волн [29], расчета потока лавы [50], затопления [58] и т.д.

Метод сглаженных частиц является несеточным лагранжевым методом. Жидкость делится на частицы, каждая из которых является элементарным носителем свойств жидкости (масса, температура, заряд). Таким образом, значение любой физической величины в точке может быть определена как сумма значений всех частиц, умноженных на весовую функцию, которая зависит от расстояний от точки до частицы.

Таким образом, рассмотренные выше модели работают для разных уровней абстракции, имеют разное назначение и могут использоваться для различных классов задач и условий применения. Однако требования виртуального полигона (см. 1.1) существенно ограничивают возможности выбора в силу того, что:

- модель должна обеспечивать прямое моделирование динамической сцены,
- модель должна быть достаточно универсальной, интерактивно управляемой,
- модель должна формировать набор данных, необходимый и достаточный для визуализации в системе виртуальной реальности, что требует отдельного рассмотрения.

## **1.4 Технологии визуализации и виртуальной реальности**

Основным способом представления результатов расчетов в виртуальных полигонах является научная визуализация. Научная визуализация, как самостоятельная область исследований, является относительно новым направлением в области информационных технологий и активно развивается примерно со второй половины 80-х годов. Прогресс в области научной визуализации, который достигнут в последние годы, был вызван активным развитием вычислительных и мультимедийных технологий, а также насущными потребностями науки и промышленности. Кроме того, текущая ситуация характеризуется стремительным ростом измеряемой и генерируемой информации, обработка которой без развитых средств визуализации практически невозможна. В наиболее общей постановке под научной визуализацией следует понимать методы и средства решения научных задач за счет привлечения к анализу данных способности человека видеть и интерпретировать изображения. В более строгой постановке научная визуализация – это междисциплинарное направление науки, основным назначением которого является визуализация многомерных динамических явлений и процессов.

Основной принцип научной визуализации предполагает, что человек гораздо лучше проникает в суть исследуемого явления, когда может «погрузиться» в пространство модели. Особенно эффект присутствия усиливается, когда человек получает возможность непосредственно манипулировать данными в этом пространстве. Такие технологии, получившие название виртуальной реальности [31][32], завоевывают все большую популярность в научном мире, однако их широкое распространение сдерживается дороговизной оборудования и определенными сложностями разработки прикладного программного обеспечения. Виртуальная реальность имитирует как воздействие, так и реакции на воздействие на моделируемую систему. Для создания убедительного комплекса ощущений реальности компьютерный синтез свойств и реакций виртуальной реальности производится в реальном времени. Системами виртуальной реальности называются устройства, которые более полно по сравнению с обычными компьютерными системами имитируют взаимодействие с виртуальной средой путем воздействия на все пять (оптимально) имеющихся у человека органов чувств. Для этого могут использоваться различные технические решения, включая шлем виртуальной реальности [92], 3D мониторы, CAVE-системы [39] и пр.

Для отслеживания движений в системах виртуальной реальности ис-

пользуются различные технологии, которые преобразуют движения рук, головы или тела пользователя в координаты. Существуют следующие типы систем отслеживания движений [91]: маркерные оптические пассивные, маркерные оптические активные, магнитные, инерциальные, механические, безмаркерные, радиолокационные и ультразвуковые.

Исследования последних лет в области человеко-компьютерного взаимодействия привели к созданию нейрокомпьютерного интерфейса [45] [36] [49] – системы, разработанной для обмена информацией между мозгом и электронным устройством. В односторонних интерфейсах внешние устройства могут либо принимать сигналы от мозга, либо посыпать ему сигналы (например, имитируя сетчатку глаза при восстановлении зрения электронным имплантатом). Двунаправленные интерфейсы позволяют мозгу и внешним устройствам обмениваться информацией в обоих направлениях. Однако стоит отметить, что использование подобных интерфейсов в настоящее время порождает серьезные споры об этической оценке их использования [24][79].

Имитации тактильных и осзательных ощущений в системах виртуальной реальности применяются для решения задач виртуального прототипирования и эргономического проектирования, создания различных тренажеров, дистанционного управления роботами, в том числе микро- и нано-, системах создания виртуальных скульптур. Примерами таких устройств могут служить платформы подвижности (motion platform) [61] или перчатки виртуальной реальности [77]. Кроме того, для имитации различных эффектов в моделируемые интерфейсы пользователя могут встраиваться устройства так называемой силовой обратной связи, которые передают удары, вибрацию и т.д. Примером таких устройств могут служить рули или джойстики, реалистично передающие вибрацию движущегося автомобиля или летательного аппарата.

Альтернативной технологией для отображения научных данных являются программно-аппаратные комплексы класса TouchTable [82][87], которые представляют собой специализированные компьютеры с большим сенсорным монитором высокого разрешения. Управление работой комплекса производится прикосновениями пальцев к поверхности монитора, расположение которого в горизонтальной плоскости, то есть в виде стола, делает удобным просмотр и анализ отображаемых пространственных данных группой пользователей.

Одной из наиболее важных особенностей научной визуализации является получение новых знаний; возможность их получения — один из главных критериев оценки эволюционного совершенства систем научной визуализации. Наиболее полно эти идеи нашли отражение в концепции когнитивной графики как совокупности приемов и методов образного

представления условий задачи, которые позволяют либо сразу увидеть решение, либо получить подсказку для его нахождения. Методы когнитивной графики используются в системах искусственного интеллекта, способных превращать текстовые описания задач в их образные представления, и при генерации текстовых описаний картин, возникающих во входных и выходных блоках интеллектуальных систем, а также в человеко-машинных системах, предназначенных для решения сложных, плохо формализуемых задач. Существует три основных задачи когнитивной компьютерной графики [15]:

- создание таких моделей представления знаний, в которых была бы возможность однообразными средствами представлять как объекты, характерные для логического мышления, так и образы-картины, с которыми оперирует образное мышление;
- визуализация тех человеческих знаний, для которых пока невозможно подобрать текстовые описания;
- поиск путей перехода от наблюдаемых образов-картин к формулировке некоторой гипотезы о тех механизмах и процессах, которые скрыты за динамикой наблюдаемых картин.

Технологии когнитивной компьютерной графики основываются в целом на формальных методах искусственного интеллекта. В то же время в ряде случаев целесообразно использовать подходы к извлечению знаний на основе прямой эксплуатации способности человека видеть и интерпретировать изображения. Для этого в настоящее время активно продвигается метод интерактивной визуализации (computational steering) [37][64]. Идея заключается в том, что пользователь по ходу процесса моделирования изменяет параметры системы, наблюдает и интерпретирует эффекты этого изменения. Технологически этот процесс реализуется за счет дополнительного слоя взаимодействия между пользователем и вычислительной средой, преобразующий поступающие от пользователя управляемые воздействия в набор параметров, которые в оперативном режиме воспринимаются вычислительной средой и позволяют производить вычисления в новых условиях без перезапуска вычислительного процесса.

Интерактивная визуализация с технической точки зрения является довольно сложной задачей, ключевыми проблемами которой для более широкого применения данной технологии являются: переориентация имеющегося ПО с пакетного режима работы на интерактивный режим, создание гибкой и расширяемой системы, поддержка «мягкого реального» времени [42]. При этом наибольшие проблемы с практическим вопло-

щением методов интерактивной визуализации возникают в распределенных средах как в силу пакетного (в основном) режима их работы, так и по причине наличия неконтролируемых (стохастических) накладных расходов при организации вычислений и передаче данных за счет коммунального характера среды. Вместе с этим, интерактивная визуализация в целом уменьшает нагрузку на распределенную среду; в таком режиме нет необходимости выполнять повторный запуск — все необходимые изменения можно сделать за одну сессию, что является несомненным преимуществом данного подхода.

Анализируя текущую ситуацию в области визуализации научных данных, можно резюмировать, что технологии научной визуализации стали неотъемлемым инструментом исследования для подавляющего большинства задач, связанных с компьютерным моделированием и экспериментом, и оказывают серьезное воздействие на сами методы научного познания. При этом широкое внедрение технологий научной визуализации связано с активным развитием сопутствующих технологий (качественное улучшение характеристик видеокарт, активное развитие пакетов прикладных программ и т.д.), однако в некоторых случаях сдерживается дороговизной и сложностью настройки предлагаемых решений (например, CAVE). В то же время проникновение логики e-Science в технологии научной визуализации привело к повышенной сложности использования соответствующего инструментария (в первую очередь, за счет неоднородности представляемых объектов и описывающих их данных); в целом для решения этой задачи необходимо привлечение интеллектуальных технологий. При этом, с одной стороны, необходимо учитывать качественную сторону проблемы — разнородность и распределенность данных, а с другой стороны, количественную — необходимость обработки значительных объемов данных. Первая проблема приводит к появлению специализированных методик визуализации распределенных научных данных (см., например, [70][85]). Вторая проблема связана с разработкой специализированных средств визуального анализа больших объемов данных (*visual mining*) (примерами таких работ могут служить исследования [86][84]).

С точки зрения виртуальных полигонов, визуализация должна:

- быть интерактивной с минимальной задержкой (частота обновления — не менее 30 кадров в секунду, время реакции не более 200 мс.<sup>1</sup>)

---

<sup>1</sup>Несмотря на то, что для многих задач реальное время ответа может составлять до нескольких секунд, а то и минут, для обеспечения удобства интерфейса сама система виртуального полигона должна обеспечивать указанные временные характеристики.

- поддержка стерео-визуализации обеспечивает естественное для человека восприятие виртуальной реальности с точки зрения оценки скорости, расстояния, и размеров объектов.
- система должна формировать изображение высокого разрешения и качества, при этом крайне желательно корректное отображение таких естественных оптических эффектов, как туман, тени, преломление, отражение, что позволяет естественным образом для человека классифицировать объекты.
- Поддержка нескольких устройств отображения: помимо основного экрана стерео-визуализации, могут присутствовать дополнительные дисплеи для отображения вспомогательной информации.

## 1.5 Постановка задачи

Задачей данной работы является создание программно-аппаратного комплекса виртуального полигона для моделирования экстремальных явлений. Требования которые сформулированы для виртуального полигона, определяют особенности реализации комплекса:

- Численный расчет реалистичного поведение судна на нерегулярном волнении в реальном масштабе времени, что накладывает следующие требования на математическую модель судна и морского волнения:
  - невысокая временная ресурсоемкость;
  - простая настройка (минимум «виртуальных» параметров моделей);
  - универсальность модели — возможность воспроизведения широкого класса явлений путем лишь изменения исходных параметров волнения или судна.
- Графическая подсистема должна обеспечивать:
  - визуализацию в стерео-режиме;
  - визуализацию графиков и диаграмм поверх основной визуализации;
  - визуализацию нерегулярного морского волнения;
  - визуализацию различных оптических эффектов, присущих; реальному сцене (тени, преломление, отражение, туман и т.д.).

- Программная часть комплекса в целом должна обеспечивать:
  - Легкость расширения (добавления новых модельных объектов).
  - Легкость настройки сценариев экстремальных ситуаций.
  - Поддержку интерактивной и пакетной обработки.
  - Поддержку сложных устройств ввода (как например, джойстики или мыши с несколькими степенями свободы).

## 1.6 Выводы по главе 1

В первой главе проведен аналитический обзор моделей динамики внешней среды и динамики морских объектов. Кроме того, рассмотрены основные принципы закладываемые в понятие виртуального полигона и современные тенденции в системах виртуальной реальности. Сформулированы требования к виртуальному полигону для воспроизведения экстремальных ситуаций.

## **Глава 2**

# **Численное моделирование динамики судна на нерегулярном волнении**

Принципиальной задачей при организации численного моделирования в виртуальном полигоне является адаптация и доработка уже существующих методов, подходов и технологий к специфике постановок виртуальных экспериментов и отображения их результатов в реальном времени. Иными словами, встраивание моделей общего плана в виртуальный полигон приводит к определенному ограничению их индивидуальных возможностей за счет унификации способов представления входных и выходных параметров. Унификация необходима для того, чтобы можно было в единой форме проводить и описывать эксперименты для различных классов экстремальных явлений. В связи с этим, виртуальный полигон является не универсальной системой для получения произвольных характеристик объекта расчетным путем, а системой класса «испытательный стенд», воспроизводящей только определенный диапазон условий. Как следствие, существующие модели требуют определенной методологической и технологической адаптации. Под методологической адаптацией понимается упрощение способов использования модели без существенных потерь качества воспроизведения экстремальных ситуаций (например, за счет различных параметризаций). Под технологической адаптацией — применение вычислительных процедур и технологий, позволяющих выполнять расчеты в реальном времени. Вопросы адаптации численных моделей динамики судна и внешней среды к задачам виртуального полигона рассмотрены ниже.

## 2.1 Математическая модель нерегулярного волнения

Используемая модель волнения аппроксимирует морскую поверхность суперпозицией конечного числа гармонических волн [22]. Характер волнения определяется двумерным энергетическим спектром  $S(\omega, \theta)$ ,  $\omega$  — угловая частота волны, а  $\theta$  — угол между направлением бега волны и направлением ветра. В литературе [22] рассматриваются различные модели спектров волнения, выраженные в терминах функции энергетической плотности от угловой частоты и направления распространения. Примером такого спектра является спектр Пирсона-Московица:

$$\begin{aligned} S(\omega, \theta) &= S(\omega) \cos^m(\theta)/C \\ S(\omega) &= \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp \left[ -\frac{5}{4} \left( \frac{\omega_{max}}{\omega} \right)^4 \right] \\ C &= \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^m \theta d\theta \end{aligned} \quad (2.1)$$

где  $m$  — четное число, характеризует направленность спектра,  $\omega_{max}$  — частоту пика спектра, а  $\alpha = 0.0081$ .

На практике непрерывный спектр волнения можно аппроксимировать конечным числом гармоник, спектральное распределение которых аппроксимирует используемый спектр. С целью быстрого построения карты высот и скоростей для сложения гармоник используется двумерное быстрое преобразование Фурье (БПФ).

При использовании БПФ следует представить энергетический спектр как функцию от волнового вектора гармоники  $\mathbf{k}$ :

$$\mathbf{k} = k\mathbf{n}, \quad k = \frac{\omega^2}{g}, \quad \mathbf{n} = (\cos\theta, \sin\theta), \quad \omega(\mathbf{k}) = \sqrt{\|\mathbf{k}\|g}$$

Рассмотрим полную энергию волнения и произведем замену переменных интегрирования, перейдя от  $(\omega, \theta)$  к волновому вектору  $\mathbf{k}$ :

$$\begin{aligned} E &= \int_0^{2\pi} \int_0^\infty S(\omega, \theta) d\omega d\theta = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{S(\sqrt{kg}, \theta)g}{2\sqrt{kg}} dk d\theta \\ &= \iint_{\mathbb{R}^2} \frac{S(\omega(\mathbf{k}), \theta(\mathbf{k}))g}{2\omega(\mathbf{k})\|\mathbf{k}\|} d\mathbf{k} = \iint_{\mathbb{R}^2} \hat{S}(\mathbf{k}) d\mathbf{k} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Теперь можно аппроксимировать непрерывный энергетический спектр конечной суммой  $N^2$  гармоник:

$$E = \iint_{\mathbb{R}^2} \hat{S}(\mathbf{k}) d\mathbf{k} \approx \sum_{i,j} \hat{S}(\mathbf{k}_{i,j}) \Delta k^2 = \sum_{i,j} E_{i,j} \quad (2.3)$$

$$\mathbf{k}_{i,j} = (i\Delta k, j\Delta k), \quad i, j = -N/2 + 1 .. N/2$$

Важно правильно выбрать значения  $\Delta k$  и  $N$ , чтобы полученные гармоники достаточно плотно покрывали наиболее энергетически плотные участки спектра.

Построив конечный дискретный энергетический спектр, перейдем к амплитудному спектру. Амплитуда гармоники  $a_{i,j} = \sqrt{2E_{i,j}} = \sqrt{2S(\mathbf{k}_{i,j})\Delta k}$ . Высоту морской поверхности в точке  $\mathbf{p}$  в момент времени  $t$  можно представить в виде суперпозиции простых гармонических волн:

$$h_w(t, \mathbf{p}) = \sum_{i,j} a_{i,j} \cos(\mathbf{p} \cdot \mathbf{k}_{i,j} - \omega(\mathbf{k}_{i,j})t + \delta_{i,j}) \quad (2.4)$$

$$= \operatorname{Re} \left( \sum_{\mathbf{k}} \tilde{h}(\mathbf{k}, t) \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}) \right)$$

где значения  $\delta_{i,j}$ , задающие фазу каждой гармоники, выбираются случайно.

Для быстрого сложения  $N^2$  гармоник было применено быстрое обратное двумерное преобразование Фурье. С его помощью эффективно вычисляются значения высот морской поверхности в узлах квадратной регулярной решетки размером  $N \times N$  и пространственной протяженностью  $\frac{2\pi}{\Delta k}$ . В используемой симуляции  $N = 512$ .

На рис. 2.1 представлены планшеты ядра БПФ и карт высот морского волнения для различных значение параметра формы углового распределения.

Давление в точке  $\mathbf{p}$  на глубине  $d$  с учетом волновой поправки выражается следующим образом:

$$p_w(t, \mathbf{p}, d) = \sum_{i,j} \gamma e^{-|\mathbf{k}_{i,j}|d} a_{i,j} \cos(\mathbf{p} \cdot \mathbf{k}_{i,j} - \omega(\mathbf{k}_{i,j})t + \delta_{i,j}) + d\gamma \quad (2.5)$$

где  $\gamma$  — объемный вес воды. Согласно этой формуле чем больше длина волны, тем медленнее затухают колебания частиц с увеличением глубины.

Так как величина  $\gamma e^{|k|z}$  зависит от волнового числа, то вынести за знак суммы его невозможно что ставит под вопрос применимость БПФ для определения давления на каждой глубине.

Предположим, что:

$$p_w(t, \mathbf{p}, d) \approx \gamma e^{-k_{max}d} h_w(t, \mathbf{p}) + d\gamma \quad (2.6)$$

где  $k_{max} = w_{max}^2/g$ . Для определения погрешности такого допущения оценим значения давления на различных глубинах. Для этого найдем среднеквадратичное отклонение значения давления на разных глубинах ( $d = 0..16m$ ) для разных частот пика максимума  $w_{max}$ . Результаты оценки ошибки продемонстрированы на рис. 2.2. Расчет показывает, что ошибка не превышает 10%.

В общем виде рассмотренная модель может строиться для частотно-направленных спектров произвольной формы (не обязательно (2.1)); однако скорость ее сходимости для разных спектральных аппроксимаций может быть различной. При этом модель, основанная на БПФ, является, по сути, линейной. Однако она может учитывать нелинейные эффекты путем нелинейного безынерционного преобразования изначально сгенерированного гауссова случайного процесса (или поля) к требуемому одномерному закону распределения. Учитывая эффективность численной реализации процедуры БПФ, применение данной модели в составе виртуального полигона является более целесообразным, чем, например, моделей на основе авторегрессии-скользящего среднего [40]. Это обусловлено их чувствительностью и нестабильностью для малых шагов сетки, что является важным для расчета гидродинамических сил и моментов интегрированием по корпусу.

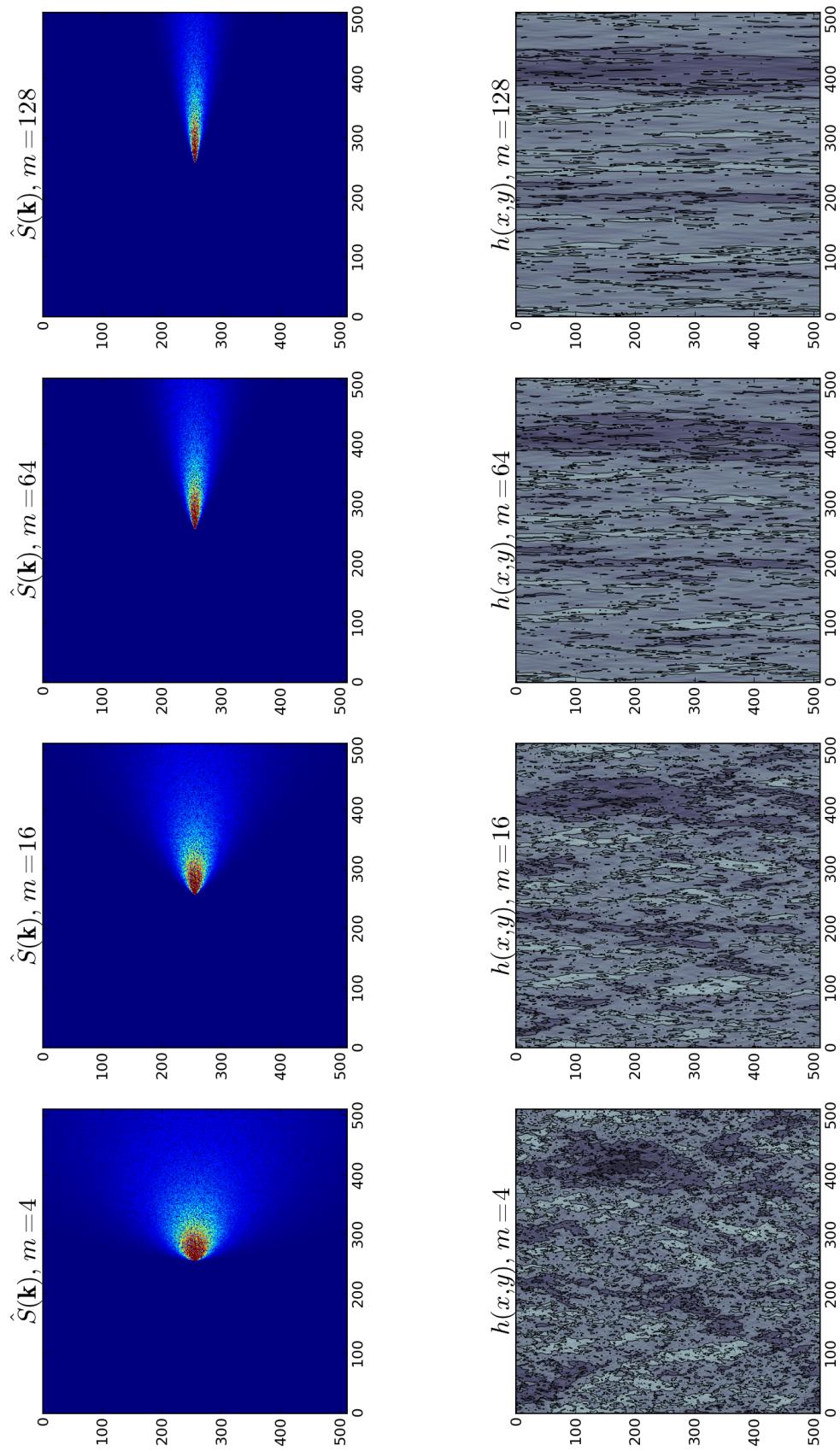


Рис. 2.1: Планеты ядра БПФ и карт высот морского волнения для различных значение параметра формы углового распределения

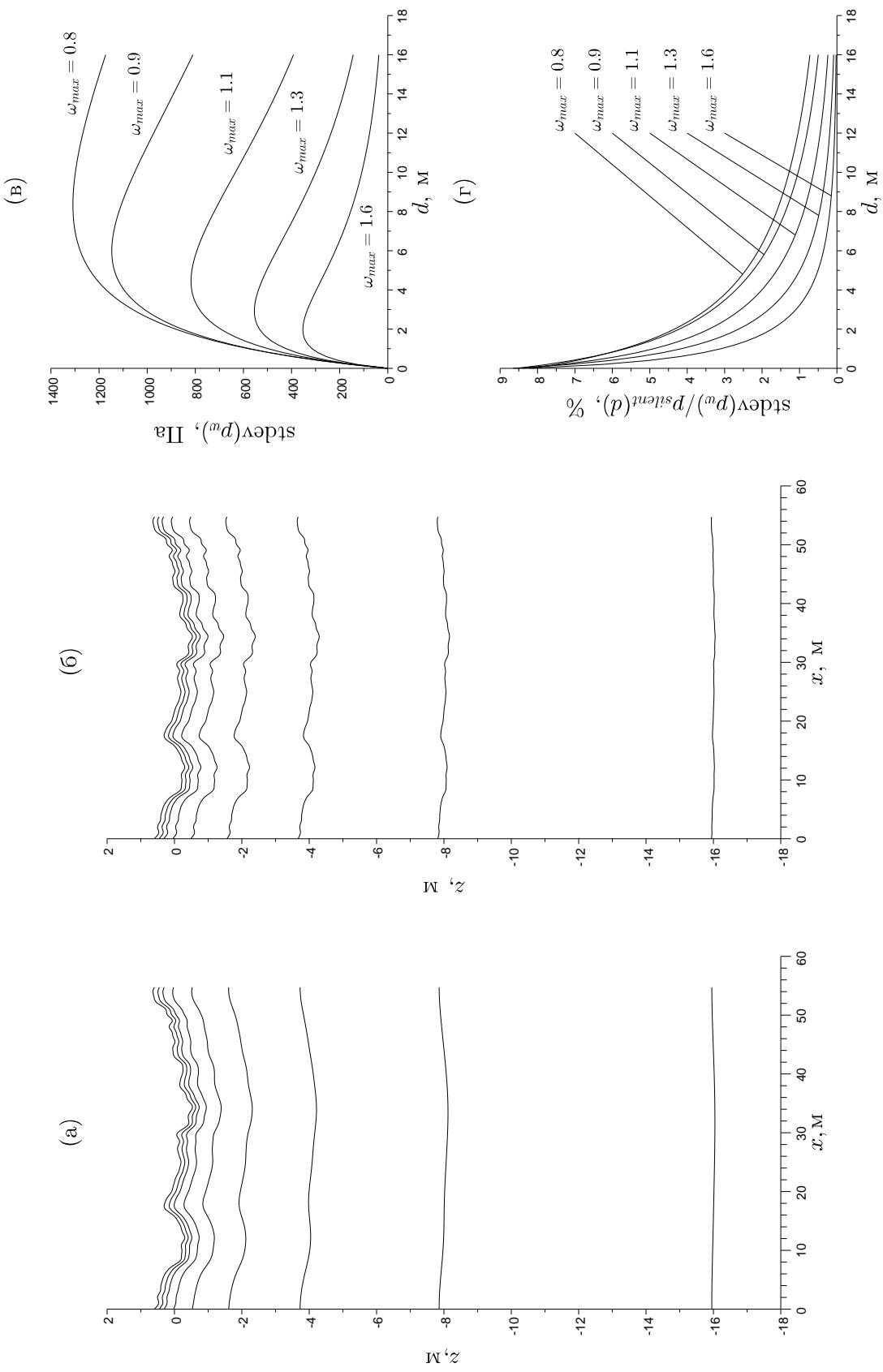


Рис. 2.2: Оценка ошибки расчета давления приближенным способом: (а) — профиль поверхности равного давления при точном расчете; (б) — профиль поверхности равного давления при приближенном расчете; (в) — стандартное отклонение ошибки расчета давления на разных глубинах для различных частот пика максимума; (г) — относительная ошибка расчета давления на разных глубинах для различных частот пика максимума.

## 2.2 Математическая модель динамики судна на нерегулярном волнении

Для построения модели распределения сил и моментов, действующих на судно, морской объект рассматривается как твердое тело с 6-ю степенями свободы. Введем параметры, описывающие положение корабля в пространстве. Для этого необходимо выбрать локальную систему координат. За начало системы локальных координат примем центр тяжести корабля, а оси расположим так, чтобы ось  $x$  была направлена вдоль корабля в направлении носовой части, ось  $y$  – влево, ось  $z$  – вверх (см. рис. 2.3).

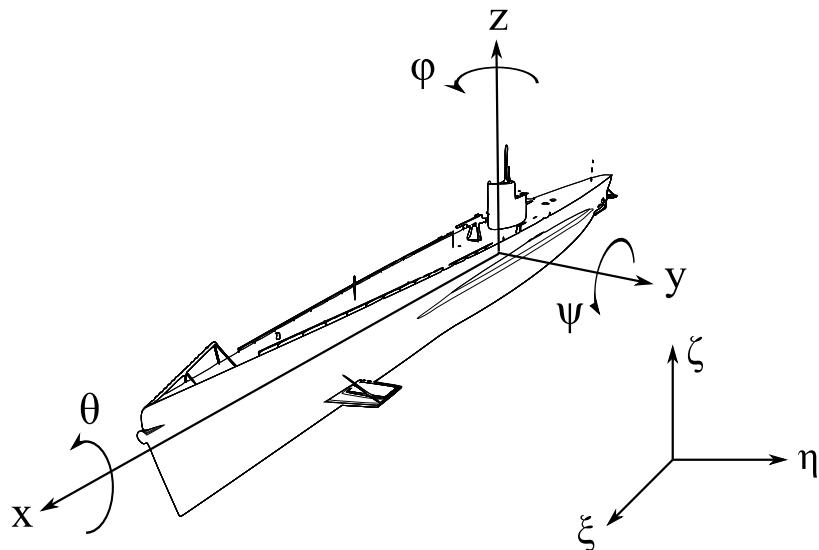


Рис. 2.3: Локальная и глобальная система координат и углы вращения судна

Положение судна в пространстве однозначно определяется кортежем из вектора положения центра тяжести и вектора вращения:  $P = (\mathbf{p}, \mathbf{q})$ , где  $\mathbf{q} = \theta \mathbf{i} + \psi \mathbf{j} + \phi \mathbf{k}$ ,  $\mathbf{p} = \xi \mathbf{i} + \eta \mathbf{j} + \zeta \mathbf{k}$ , где, в свою очередь  $\theta, \psi, \phi$  – углы крена, дифферента и курса, соответственно,  $\xi, \eta, \zeta$  – глобальное положение центра тяжести судна, соответственно, а  $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$  – орты глобальной системы координат. Выпишем второй закон Ньютона:

$$m\ddot{\mathbf{p}} = \mathbf{F} \quad (2.7)$$

$$\mathbf{J}\ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{M} \quad (2.8)$$

где  $m$  – сумма массового водоизмещения корабля и присоединенной жидкости,  $\mathbf{J}$  – тензор инерции судна и присоединенной жидкости.

Рассмотрим подробнее силу и момент, стоящие в правых частях уравнений (2.7) и (2.8). Так как ненулевой момент является результатом приложения нецентральной силы, то достаточно рассмотреть следующие силы, действующие на судно (см. рис. 2.4):

1. Сила тяжести, приложенная к центру тяжести и направленная вниз.
2. Силы гидростатического и гидродинамического давления воды, приложенные к каждой точке корпуса, находящейся в воде, и направленные вдоль нормали к поверхности.
3. Демпфирующие силы, приложенные к каждой точке корпуса, находящейся в воде, и действующие в направлении против направления движения данной точки корпуса, пропорциональны скорости относительно воды и квадрату синуса угла между нормалью в точке и направлением вектора скорости.

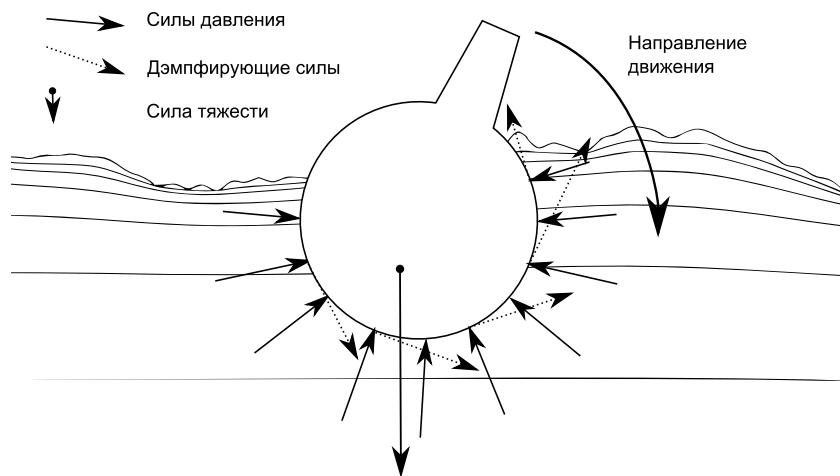


Рис. 2.4: Силы, действующие на судно

Суммарные сила и момент, действующие на судно, могут быть выражены следующим образом (индекс  $p$  обозначает силы давления, а  $d$  — силы демпфирования):

$$\mathbf{F} = - \left[ \iint_S p \mathbf{n} dS \right]_p - \left[ \iint_S H \mathbf{v} dS \right]_d + \mathbf{D} \quad (2.9)$$

$$\mathbf{M} = - \left[ \iint_S (p \mathbf{n}) \times (\mathbf{r} - \mathbf{p}) dS \right]_p - \left[ \iint_S (H \mathbf{v}) \times (\mathbf{r} - \mathbf{d}) dS \right]_d \quad (2.10)$$

где  $S$  — погруженная поверхность корпуса судна,  $D$  — весовое водоизмещение судна,  $p$  — гидростатическое и гидродинамическое давление воды в точке,  $\mathbf{n}$  — нормаль к поверхности,  $r$  — радиус-вектор точки поверхности в глобальных координатах,  $\mathbf{p}$  — положение судна в пространстве,  $H$  — коэффициент вязкого сопротивления,  $\mathbf{v}$  — скорость частиц воды вдоль элемента поверхности корпуса судна.

Аналитическое вычисление выражений (2.9) и (2.10) возможно только для модельной формы корпуса. Как следствие, необходимо на каждом шаге выполнять численное интегрирование. Поверхность корпуса судна разбивается на  $N$  элементов, размер которых настолько мал, что изменением давления или демпфирующей силы вдоль элемента можно пренебречь. Общая сила и момент рассматривается как сумма сил приложенных к каждому элементу. Таким образом, выражения (2.9) и (2.10) можно переписать следующим образом:

$$\mathbf{F} = - \sum_{i=1}^N [\sigma(\mathbf{r}_i) p_i \mathbf{n}_i \Delta S_i] - \sum_{i=1}^N [\sigma(\mathbf{r}_i) H_i \mathbf{v}_i \Delta S_i] \quad (2.11)$$

$$\mathbf{M} = - \sum_{i=1}^N [\sigma(\mathbf{r}_i) p_i \mathbf{n}_i \Delta S_i \times (\mathbf{r}_i - \mathbf{p})] - \sum_{i=1}^N [\sigma(\mathbf{r}_i) H_i \mathbf{v}_i \Delta S_i \times (\mathbf{r}_i - \mathbf{p})] \quad (2.12)$$

где:

$$\sigma(t, \mathbf{r}) = \begin{cases} 1 & r_z < h_w(t, r_x \mathbf{i} + r_y \mathbf{j}) \\ 0 & r_z \geq h_w(t, r_x \mathbf{i} + r_y \mathbf{j}) \end{cases} \quad (2.13)$$

Площадь элемента вычисляется:

$$\Delta S_i = \frac{S}{N} \quad (2.14)$$

а давление на элемент:

$$p_i = p_w(t, \xi \mathbf{i} + \eta \mathbf{j}, -\zeta) + cp_{dyn} \quad (2.15)$$

где  $p(t, \xi, \eta, \zeta)$  — гидростатическое давление,  $p_{dyn}$  — гидродинамическое давление,  $c$  — безразмерный коэффициент влияния гидродинамического давления, который используется для обеспечения гибкости в определении гидродинамических свойств судна.

Расчет силы демпфирования воды в общем случае является чрезвычайно трудоемким процессом. Но в силу в силу того, что в большинстве штатных и экстремальных режимов эксплуатации судов водоизмещающего типа гидродинамические силы, которыми обусловлены силы демпфирования, вносят весьма малую долю среди всех сил, действующих на корабль (число Фруда по водоизмещению меньше 0.2), можно воспользоваться приближенным Ньютоновским подходом.

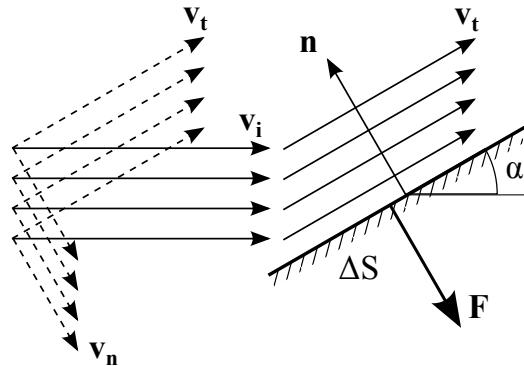


Рис. 2.5: Взаимодействие потока воды с элементом поверхности судна.

Рассмотрим элемент поверхности  $\Delta S$ , с нормалью  $\mathbf{n}$ , наклоненный под углом  $\alpha$  к направлению набегающего потока (рис. 2.5).

Масса частиц, сталкивающихся с этим элементом поверхности в единицу времени, равна  $\rho |\mathbf{v}_i| \Delta S \sin(\alpha)$ . Где  $\rho$  — плотность среды,  $|\mathbf{v}_i|$  — модуль скорости набегающего потока. При этом вектор скорости можно разложить на тангенциальную и нормальную компоненту ( $\mathbf{n} \uparrow\downarrow \mathbf{v}_n$ ):  $\mathbf{v}_i = \mathbf{v}_t + \mathbf{v}_n = \mathbf{v}_i \cos(\alpha) + \mathbf{v}_i \sin(\alpha)$ .

Сила, действующая в результате неупругого столкновения с элементом  $\Delta S$ , может быть выражена через закон сохранения импульса:

$$\mathbf{F} = -\mathbf{v}_n \rho |\mathbf{v}_i| \Delta S \sin(\alpha) = -|\mathbf{v}_i|^2 \rho \Delta S \sin^2(\alpha) \mathbf{n} \quad (2.16)$$

Таким образом, давление может быть выражено следующим образом:

$$p_{dyn} = \frac{|\mathbf{F}|}{\Delta S} = |\mathbf{v}_i|^2 \rho \sin^2(\alpha) \quad (2.17)$$

Для определения вязкого сопротивления потребуется значение тангенциальной скорости потока вдоль элемента  $\Delta S$  равный  $\mathbf{v}_t = |\mathbf{v}| \cos(\alpha)$ . Сила, действующая против направления тангенциальной скорости потока, может быть выражена следующим образом:

$$\mathbf{F}_v = -\mathbf{v}_t \Delta S H \quad (2.18)$$

Использование регулярной сетки разбиения корпуса на элементы нецелесообразно, так как это может вызвать невязку обусловленную регулярным дискретным характером сетки при аппроксимации непрерывно изменяющегося профиля мгновенной ватерлинии, а как следствие — постоянные нескомпенсированные силы (рис. 2.6).

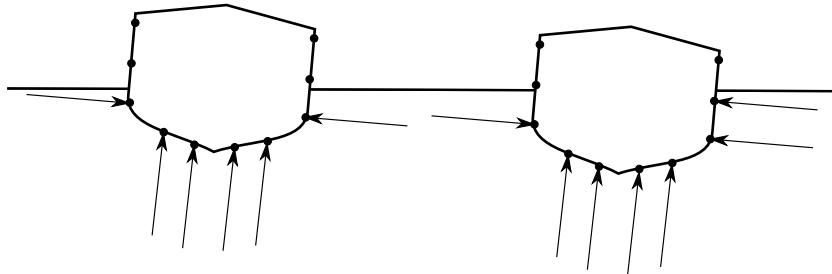


Рис. 2.6: Иллюстрация вычислительных артефактов за счет скачкообразного изменения гидродинамических сил при использовании регулярных сеток

Для устранения эффектов, указанных на 2.6, для интегрирования (2.9) и (2.10) используются квадратурные формулы типа Маркова с локально распределенными случайными узлами, положение которых меняется на каждом шаге имитационного моделирования. Пример случайной сетки приведен на рис. 2.7.

Для моделирования явлений связанных с движением и управлением судна, а также моделирования внешних воздействий (например, воздействие шквала) вводятся понятия внешней силы  $\mathbf{F}_{ext}$  и внешнего момента  $\mathbf{M}_{ext}$ , которые в свою очередь могут быть суммой разных по природе сил

и моментов (например, воздействие ветра и буксировочная сила). Таким образом, выражения (2.11) и (2.12) могут быть расширены следующим образом:

$$\mathbf{F} = - \sum_{i=1}^N [\sigma(\mathbf{r}_i) p_i \mathbf{n}_i \Delta S_i] - \sum_{i=1}^N [\sigma(\mathbf{r}_i) H_i \mathbf{v}_i \Delta S_i] + \mathbf{F}_{ext} \quad (2.19)$$

$$\mathbf{M} = - \sum_{i=1}^N [\sigma(\mathbf{r}_i) p_i \mathbf{n}_i \Delta S_i \times (\mathbf{r}_i - \mathbf{p})] - \sum_{i=1}^N [\sigma(\mathbf{r}_i) H_i \mathbf{v}_i \Delta S_i \times (\mathbf{r}_i - \mathbf{p})] + \mathbf{M}_{ext} \quad (2.20)$$

Такая модель является очень удобной для использования в виртуальных полигонах, так как динамическая сцена управляетя «не абстрактно», а непосредственно через модель, что обеспечивает устойчивость вычислений даже при весьма «резких» воздействиях пользователя. Например, такой подход позволяет избежать непосредственной установки скорости движения судна (что является некорректным, так как при движении судна на нерегулярном волнении мгновенная скорость не может быть постоянной), а задавать буксировочную силу, соответствующую заданной скорости на тихой воде при определенной осадке. В свою очередь, это может быть полезно при экспериментальном определении частотных характеристик судна.

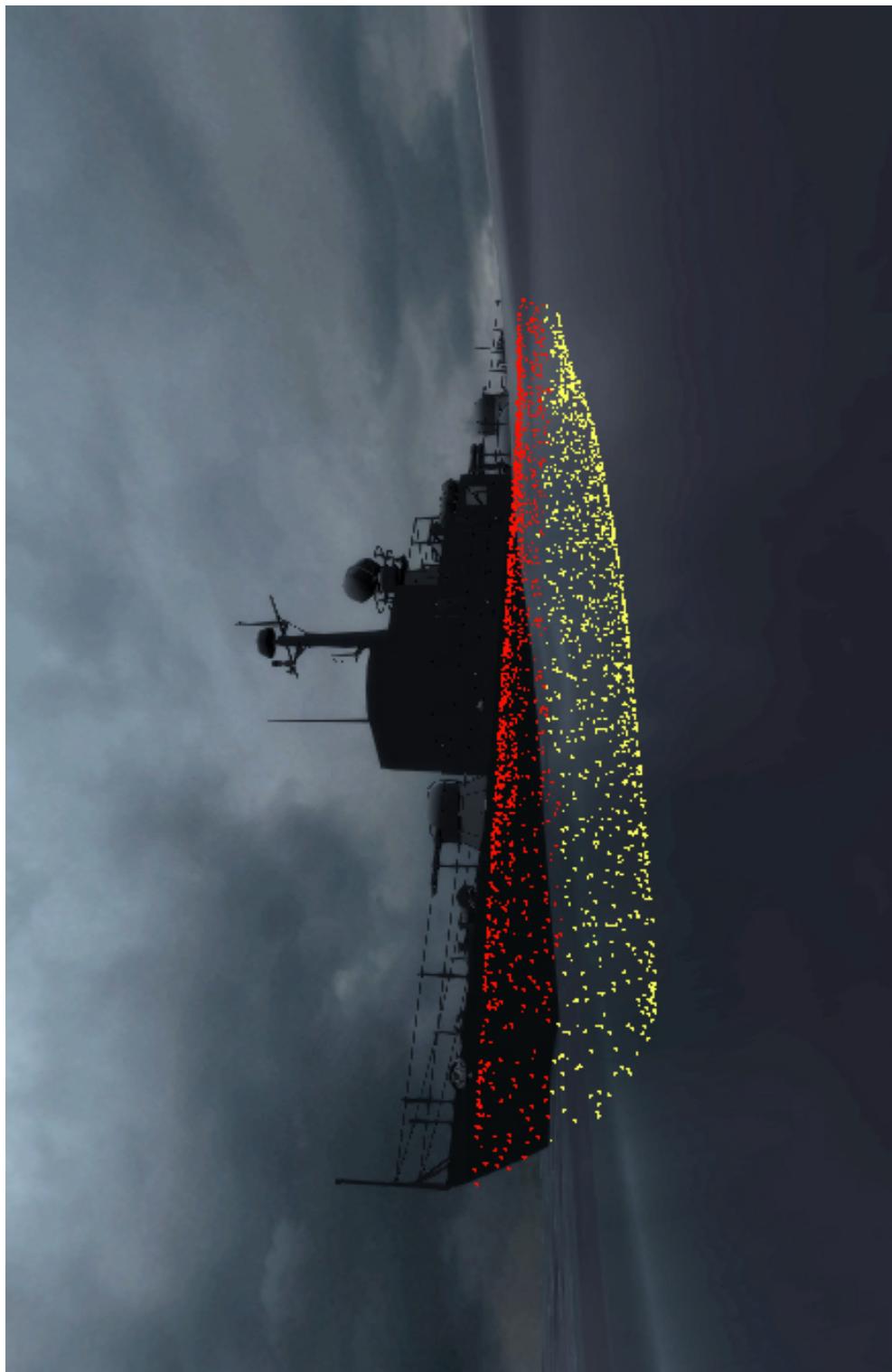


Рис. 2.7: Пример сетки с локально-распределенными случайными узлами

## 2.3 Оценка влияния случайного характера сеток на расчет статических и динамических характеристик судна

Случайное перестроение узлов может вносить в выражения (2.9) и (2.10) дополнительную вычислительную погрешность. Для оценки накапливающей ошибки были проведены эксперименты по оценке чувствительности расчетных характеристик к количеству узлов сетки. На рис. 2.8 представлены фазовые портреты «численного дрейфа» (в плоскости  $XY$ ) центра тяжести судна вокруг исходного положения (расчеты на тихой воде). На каждом графике показаны траектории движения центра тяжести судна для 10 запусков, каждый из которых длился 60 секунд.

Из рис. 2.8 видно, что даже для достаточно грубых сеток погрешность не превышает 1 м, что является относительно небольшой величиной по сравнению с масштабами дрейфа под воздействием морского волнения.

Дополнительно следует определить допустимую плотность расположения точек для задач статических расчетов. Для этого проведем серию экспериментов по определению диаграммы статической остойчивости для разного количества точек. Результаты эксперимента представлены на рис. 2.9. На основании экспериментальных данных можно сделать вывод, что 8000 точек достаточно для проведения статических расчетов.

## 2.4 Идентификация модели

Для идентификации модели рассмотрим процесс бортовой качки корабля на тихой воде. В качестве испытательного образца возьмем модель судна класса «катер», который обладает следующими характеристиками:

длина:  $L = 40$  м

ширина:  $B = 7$  м

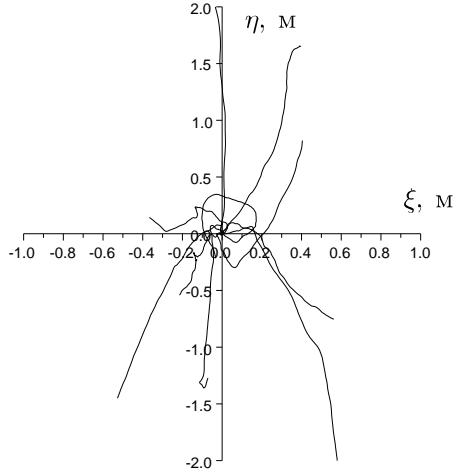
вес:  $D = 6000$  кН

коэффициент гидродинамического давления:  $c = 1.0$

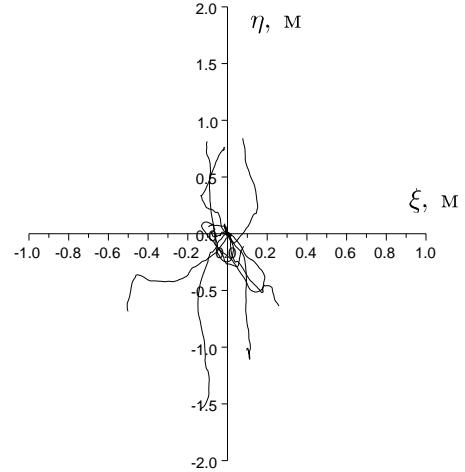
коэффициент демпфирования:  $H = 0.1$

Для определения метacentрической высоты построим диаграмму статической остойчивости (ДСО) путем проведения виртуального кренования — замера плеча восстанавливающего момента в зависимости от угла

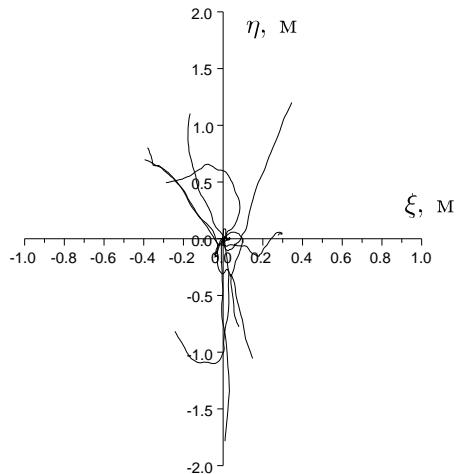
Численный дрейф :  $N = 500$



Численный дрейф :  $N = 1000$



Численный дрейф :  $N = 2000$



Численный дрейф :  $N = 4000$

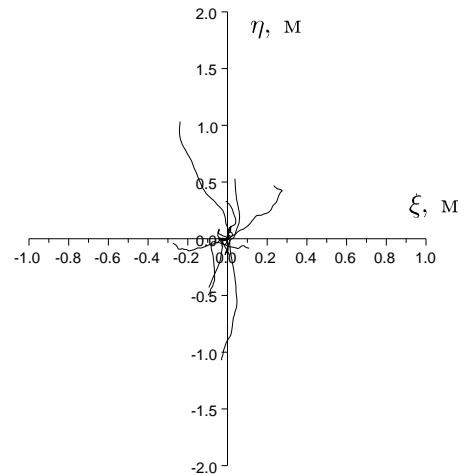


Рис. 2.8: Фазовые портреты численного дрейфа судна в зависимости от количества точек  $N$

крана погруженного в воду судна. Результат кренования продемонстрирован на рис. 2.10. Так как начальная метацентрическая высота равна дифференциальному ДСО в нулевой точке, то  $h = 1.29$ .

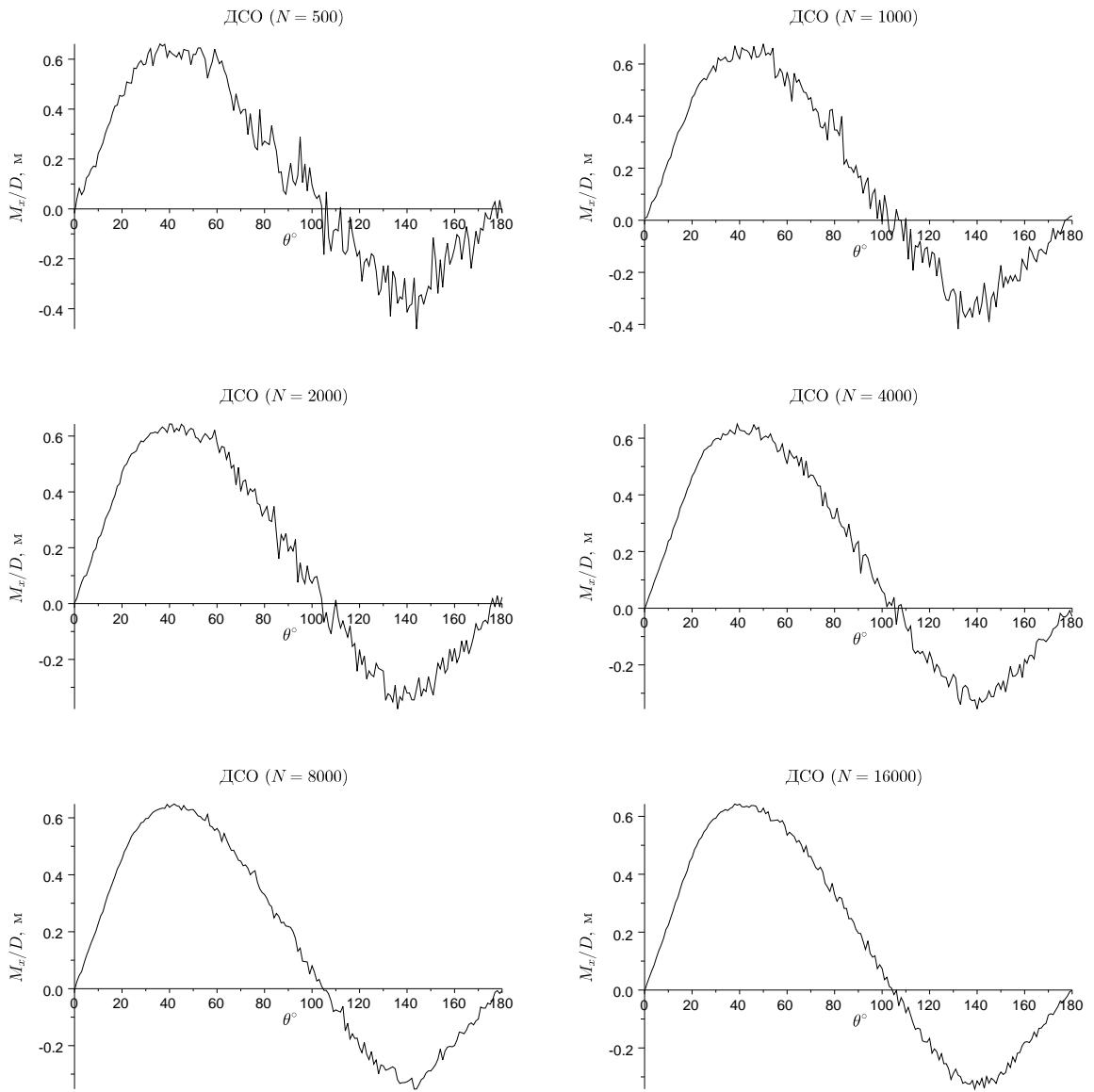


Рис. 2.9: Зависимость точности построения ДСО от количества точек  $N$

Момент инерции вокруг оси  $X$  судна может быть приближенно вычислен по следующей формуле [16]:

$$I_x = \left(\frac{C}{2}B\right)^2 \frac{D}{g} \quad (2.21)$$

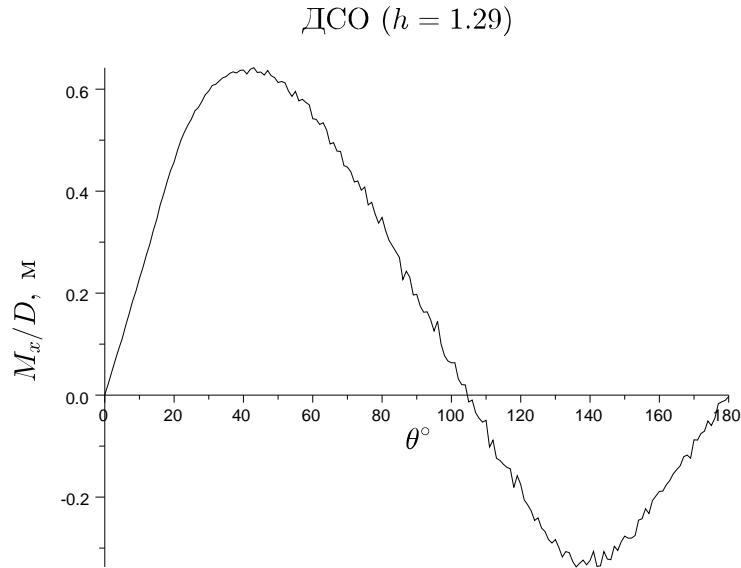


Рис. 2.10: Диаграмма статической остойчивости для задачи идентификации модели

где  $C$  лежит в диапазоне  $0.70 - 0.90$  в зависимости от формы обводов корпуса. Для испытуемого судна возьмем значение  $C$  равное  $0.8$ , тогда  $I_x \approx 4\ 704\ 000 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

Момент сил сопротивления бортовым колебаниям может быть вычислен по формуле, полученной Бертеном [16]:

$$M_{roll} = kLB^4\dot{\theta}^2 \quad (2.22)$$

где  $k$  лежит в диапазоне  $10.0 - 20.0$ . Для испытуемого судна возьмем значение  $k$  равное  $15.0$ .

Следует отметить, что коэффициенты  $C$  и  $k$  выбираются в первом приближении и в дальнейшем будут скорректированы.

Составим дифференциальное уравнение бортовых колебаний судна:

$$I_x\ddot{\theta} + kLB^4\dot{\theta}^2 + Dh\theta = 0 \quad (2.23)$$

Для идентификации модели корабль помещается на тихую воду с начальным креном  $5$  градусов. Сравнение записи качки с результатом решения уравнение представлена на рис. 2.11.

Диаграмма качки (а) ( $C = 0.80$ ,  $k = 15$ )

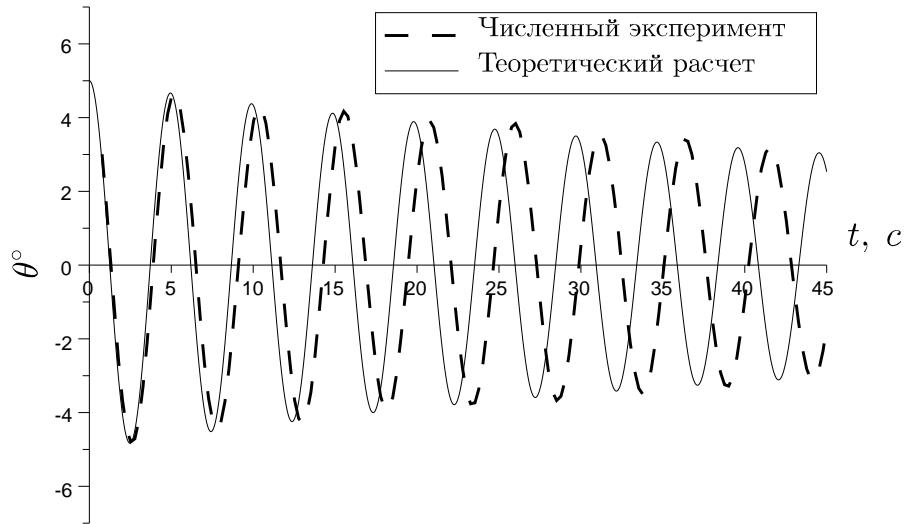


Диаграмма качки (б) ( $C = 0.84$ ,  $k = 16$ )

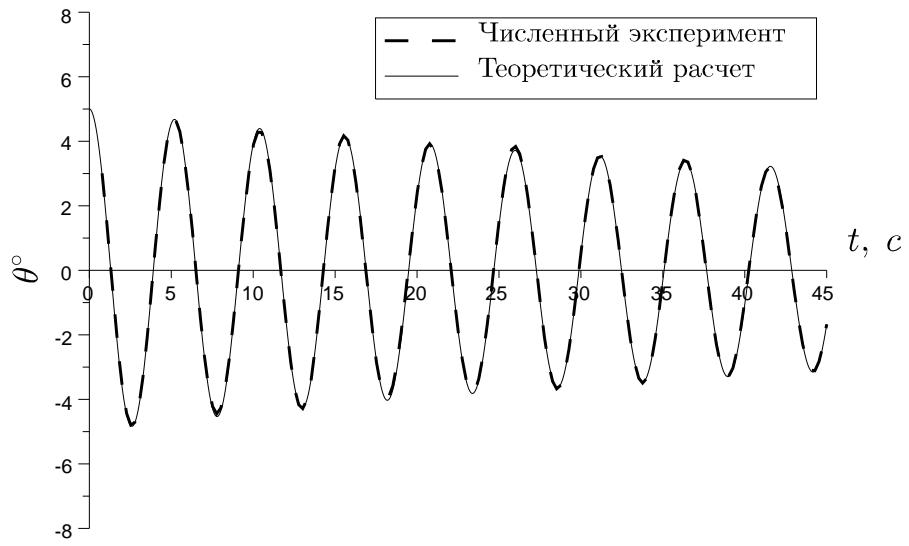


Рис. 2.11: Сравнение результатов численного эксперимента и решения уравнения бортовой качки: (а) — предварительная оценка коэффициентов  $C$  и  $k$ , (б) — последующая корректировка коэффициентов  $C$  и  $k$ .

На рис. 2.11 (а) видно, что имеется заметное различие в периодах качки и незначительное различие в степени затухания. Необходимо уточнить коэффициенты, что можно сделать путем нахождения коэффициентов  $C$  и  $k$  аппроксимируя экспериментальную кривую теоретической. Аппроксимация показала, что  $C = 0.84$ , а  $k = 16$ , что находится в пределах значений характерных для большинства судов классической формы. На рис. 2.11 (б) представлены диаграммы качки с учетом корректировки коэффициентов.

## 2.5 Выводы по главе 2

Во второй главе подробно рассмотрены модель внешней среды и модель динамики судна. Предложен способ интегрирования сил действующих на судно с использованием квадратурных формулам типа Маркова. Путем проведения экспериментов и сравнения результатов с классическими уравнениями динамики судна осуществлена процедура валидации и идентификации модели.

## **Глава 3**

# **Программно-аппаратный комплекс виртуального полигона**

### 3.1 Состав и общая архитектура ПАК

Разрабатываемый виртуальный полигон предназначен для выполнения имитационного моделирования динамики морских объектов под воздействием внешних возмущений. Как следствие, под задачей унификации в данном разделе понимается установление взаимосвязей общей (имитационной, численной) модели динамики судна с «эталонными» моделями, повсеместно используемыми для расчета качки судна в оперативных условиях эксплуатации.

В отличие от традиционных моделей динамики судна (например, в форме уравнений движения), имитационная модель динамики судна представляет собой не только формализацию основных соотношений между входными и выходными данными, но и набор механизмов для проведения виртуальных экспериментов, которые должны:

1. Обеспечивать настройку параметров имитационного моделирования в широких пределах.
2. Создавать сценарии моделирования: параметры изменяются не только в начале, но и в процессе моделирования.
3. Осуществлять интерактивную визуализацию процесса имитационного моделирования для осуществления качественного анализа явлений и отладки.
4. Обеспечивать экспорт данных, в частности, в пакеты математического моделирования и проектирования.

Таким образом, формой реализации имитационной модели является среда имитационного моделирования, которая содержит следующие специализированные и общие подсистемы:

1. Ядро («Core»). В ядро подсистемы входят:
  - (a) Библиотека математики, которая включает как стандартные математические объекты, такие как вектора, матрицы и кватернионы, так и более сложные, например такие объекты как видовые пирамиды (frustum), ограничивающие объемы (bounding sphere и bounding box).
  - (b) Интерпретатор Lua, которые используется для конфигурирования и управления виртуальным полигоном, а также для поддержки подсистемы сценариев.

- (c) Интерфейс операционной и файловой системы.
  - (d) Система конфигурирования.
2. Библиотека поддержки визуализации («Graphic Factory», собственная разработка), которая независимо от используемого графического API обеспечивает:
- Загрузку, обработку и сохранение трехмерных полигональных сеток в формате собственной разработки ESX (Extensible Scene XML file). В задачи обработки трехмерных полигональных сеток входят:
    - разрезание, склеивание, оптимизация геометрии;
    - скелетная анимация;
  - Загрузку, обработку и сохранение двумерных изображений в формате BMP, JPEG, TGA, PNG и другие. Основан на использовании библиотеки FreeImage [80].
  - Загрузку, обработку и сохранение файлов анимации в собственной формате EAX (Extensible Animation XML-file). Файлы анимации могут быть использованы для анимации визуализируемой сцены (например, винты, рули или механизированные элементы надстройки корабля), анимации камеры в демонстрационном режиме и др.
3. Графическая подсистема («Reality Sequencer», собственная разработка) отвечает за подготовку сцены к отображению, построение теней, расчета освещения, пост-обработки, а также отображение элементов пользовательского интерфейса как в моно- так и в стереорежиме. В список графических объектов входят:
- (a) твердые объекты (Solids);
  - (b) водная поверхность (Water)<sup>1</sup>;
  - (c) отладочные линии (Debug lines);
  - (d) элементы пользовательского интерфейса и текст;
  - (e) источники света.

---

<sup>1</sup>Так как генерация взволнованной поверхности осуществляется с использованием графического ускорителя, генератор и визуализатор водной поверхности для упрощения системы объединены в одну подсистему. Обращаясь к графической подсистеме любая другая подсистема может задать спектр волнения и запросить характеристики водной среды в любой точке и любой момент времени.

4. Звуковая подсистема реализована с использованием [44] и предназначена для:
  - воспроизведение Фонового стерео- и квадрофонического звука в форматах Wave PCM, Vorbis OGG, MP3 и др.
  - микширование с наложением эффектов окружения звуков, позиционированных в пространстве, с учетом скорости перемещения и позиции как звуков, так и слушателя.
5. Физическая подсистема реализована как интерфейс к физической библиотеке Bullet [48]. Реализация включает в себя:
  - Твердые динамические тела
  - Твердые статические тела
  - Твердые кинематические тела
  - Сочленения с шестью степенями свободы (6-DOF), ограничениями (constraints), пружинами (springs) и моторами (motors).
6. Подсистема имитационного моделирования использует ("Extensible Sandbox") представляет собой расширяемую библиотеку сущностей и параметров окружения, в число которых входят такие классы сущностей как:
  - (a) «Таймер» — запускает Lua-функцию в заданный момент времени
  - (b) «Корабль» — реализует в себе модель распределения сил и моментов, получает данные о море.

Настраиваемым параметром окружения являются параметры волнения. Подсистема имитационного моделирования позволяет также добавлять новые объекты и обеспечивает возможность их взаимодействия.

На рис. 3.1 показаны уровни абстракции в разработанной системе. Каждый элемент каждого уровня использует соседние элементы, а также все нижележащие элементы за исключением уровня операционной системы. Доступ к операционной системе разрешен лишь интерфейсу операционной и файловой системы. Такой подход облегчает дальнейшее портирование системы на другие платформы, а также упростить ряд типовых задач взаимодействия с операционной системой.

Следует отметить требования к аппаратному обеспечению. К ним относятся:

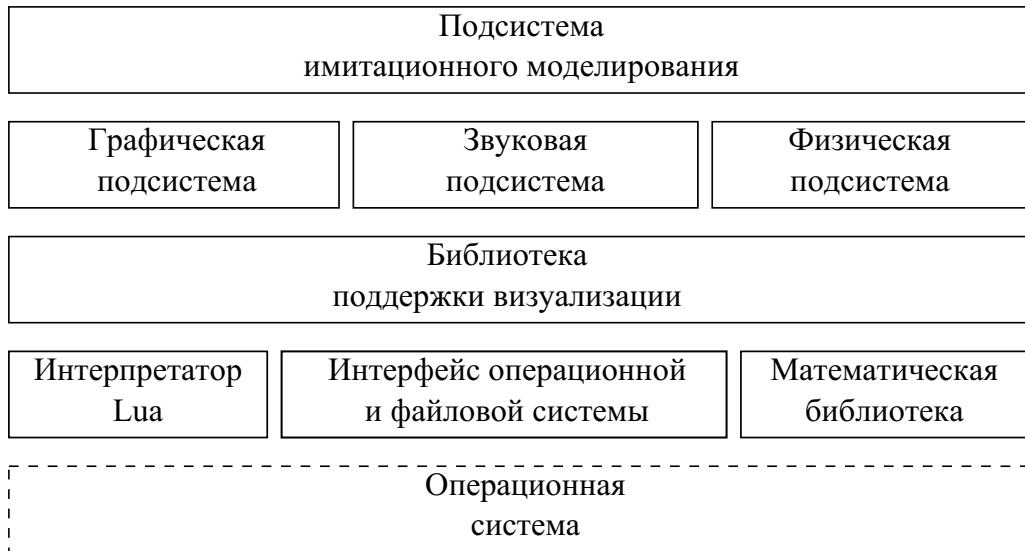


Рис. 3.1: Уровни абстракции приложения

- Для задачи визуализации и выполнения гидромеханических расчетов необходим видео-ускоритель с поддержкой:
  - архитектуры CUDA
  - графической библиотеки OpenGL версии 3.3.
  - модели шейдеров vp40, fp40 — поддержка расширений *GL\_NV\_fragment\_program4* и *GL\_NV\_vertex\_program4*.
- Для задач стерео-визуализации необходимо наличие:
  - поддержки видео-ускорителем технологии OpenGL quad buffered stereo;
  - средств отображения стерео-контента, таких как стерео-проекторы или стерео-мониторы.
- Эффективное взаимодействие пользователя с ВП обеспечивают комплекс устройств ввода, включающий как стандартные мышь и клавиатура, так и более развитые средства, такие как мыши с несколькими степенями свободы.

- Погружение в акустическую картину виртуального мира необходи-  
ма установка звуковой системы объемного звучания.

## 3.2 Подсистема моделирования

Основной задачей подсистемы имитационного моделирования является управление сущностями (создание, обработка и уничтожение, а также их взаимодействие) и настройка параметров окружающей среды. Подсистема сценариев тесно связана с использованием языка программирования Lua [99].

### 3.2.1 Сущности и фабрика сущностей

Для достижения высокого уровня абстракции и модульности в виртуальном полигоне применяются механизмы наследования и виртуальные функции. Полиморфизм, предоставляющий отложить выбор вызываемой функции (а как следствие — поведение объектов) на период выполнения программы, обеспечивает повторное использование бинарного кода и его расширение.

Для обеспечения возможности определения типа создаваемого объекта во времени исполнения его необходимо указать. Механизм специализации типа создаваемого объекта называется фабрикой объектов [12].

Фабрика позволяет зарегистрировать фабричный метод (функцию создания объекта конкретного класса) и ассоциировать с ним некоторый дескриптор (например, константную строку). Следует отметить, что зарегистрировать фабричный метод можно не только на этапе компиляции, но и на этапе выполнения.

Создать объект заданного класса можно, вызвав соответствующий метод фабрики класса и указав дескриптор. Также в фабричный метод можно передать дополнительные параметры создания объекта.

В данной реализации виртуального полигона все создаваемые объекты называются «сущностями» и наследуются от абстрактного класса `entity`.

Listing 3.1: Декларация класса `entity`

---

```
class entity {
public:
    entity           ( uint id );
    virtual ~entity ( void ) {};

    virtual void    spawn      ( lua_State *L, int tidx ) = 0;
    virtual void    think      ( float dtime ) = 0;
    virtual int     command   ( const string &cmd,
                                lua_State *L ) = 0;
```

```
};
```

---

Сущность должна создаваться, существовать и при этом выполнять некоторую полезную функцию, а также реагировать на внешние события. В момент создания вызывается метод `spawn`, в который передается указатель на виртуальную машину и индекс таблицы-дескриптора в стеке Lua. Это позволяет создавать объекты путем вызова методов на языке Lua.

На каждом шаге моделирования у каждой созданной сущности вызывается метод `think`, в который передается время прошедшее с предыдущего шага моделирования.

Для того чтобы взаимодействовать с сущностью используется метод `command`, который можно рассматривать как «приказ». В метод `command` передается строковая команда и указатель на виртуальную машину Lua, что позволяет через стек Lua передать любые параметры. Такой подход обеспечивает возможность отдачи команд не только из C++ кода, но и из Lua кода.

Центральной компонентой системы имитационного моделирования является фабрика сущностей. Интерфейс фабрики представлен ниже.

Listing 3.2: Интерфейс фабрики сущностей

---

```
class factory {
public:
    factory      ( void );
    ~factory     ( void );

    typedef       entity  *(*create_func) ( uint id );

    void         register_class   ( const string &classname ,
                                    create_func create );
    uint         spawn_entity    ( const string &classname ,
                                lua_State *L, int tidx );
    void         kill_entity     ( uint id );
    void         kill_all        ( void );
    entity      * get_entity    ( uint id );
    entity      * get_entity    ( const string &name );
};
```

---

Метод `register_class` регистрирует класс сущностей путем ассоциирования имени класса (`classname`) и фабричного метода (`create`).

Метод `spawn_entity` порождает сущность класса `classname`. Также в функцию передается указатель на виртуальную машину Lua и индекс

таблицы-дескриптора, которая может быть использована для параметризации создаваемой сущности. Метод возвращает уникальный индекс сущности, по которому в дальнейшем к данной сущности можно обращаться.

Метод `kill_entity` — уничтожает сущность с указанным индексом.

Метод `kill_all` — уничтожает все созданные сущности.

Метод `get_entity` — возвращает указатель на сущность по индексу или по имени.

На данный момент реализована следующие классы сущностей:

- «Корабль».
- «Таймер».

### 3.2.2 Lua API виртуального полигона

Для обеспечения гибкости и универсальности виртуального полигона используется язык программирования Lua. Такой подход позволяет создавать сценарии экспериментов «на ходу», не перезапуская виртуальный полигон. Для обеспечения работы виртуального полигона и доступа к фабрике сущностей предусмотрены следующие Lua-функции:

- `scenario.start` — запускает сценарий, которые задается Lua-файлом.
- `scenario.end` — завершает сценарий, виртуальный полигон переходит в режим ожидания. Никаких процессов моделирования не осуществляется.
- `scenario.spawn` — создает экземпляр сущности заданного класса. Аргументы функции: имя класса сущности и таблица-дескриптор. Возвращает индекс сущности.
- `scenario.kill` — уничтожает сущность с указанным именем или индексом.
- `scenario.kill_all` — уничтожает все сущности.
- `scenario.command` — транслирует команду сущности, заданной по имени или индексу.
- `scenario.time` — возвращает текущее глобальное модельное время.
- `scenario.set_gravity` — устанавливает уровень гравитации.

- `scenario.set_waving` — устанавливает параметры морского волнения:
  - Частота пика спектра  $\omega_{max}$ .
  - Параметр формы углового распределения  $m$ .
  - Параметр узости спектра JONSWAP  $\gamma$ .

### 3.2.3 Объект «Таймер»

Важной задачей в процессе моделирования является выполнение той или иной функции в заданный момент времени или с постоянным интервалом. Для этого реализована сущность «Таймер». При создании таймер получает в качестве параметров:

- Интервал срабатывания — временной интервал, через который будет вызываться Lua-функция. Если интервал равен 0, то функция будет вызываться на каждом шаге моделирования.
- Режим работы: однократное срабатывание или многократное.
- Lua-функция для вызова<sup>2</sup>.

Пример создания таймера на языке Lua представлен ниже:

Listing 3.3: Пример создания таймера

---

```
local id1 = scenario.spawn {
    classname = "timer";
    period = 0.250;
    once = false;
    func = function ()
        print("timer function")
    end
}
```

---

Созданный таким образом «таймер» будет многократно с интервалом 250 мс выводить на консоль текст «timer function».

Сам по себе объект таймер является достаточно примитивным и не очень удобным для выполнения различных задач. Поэтому для упрощения исследования динамики морских объектов была реализована система задач.

---

<sup>2</sup> В языке Lua функции являются объектами первого класса и могут быть переданы как параметр в функцию аналогично объекту любого другого типа [65]

## **Реализация системы задач на базе сущности «Таймер»**

Типовой эксперимент в численном исследовании динамики морского объекта заключается в следующем:

1. Создание судна и формирование параметров окружения (в данном случае параметров морского волнения).
2. Выполнение на каждом кадре моделирования некоторого действия, например, удержание судна в заданной точке.
3. Выполнение некоторого действия с заданным интервалом, например, запись в журнал текущих параметров судна
4. Уничтожение судна иброс параметров морского волнения по прошествию некоторого времени. Обычно эксперимент длится от 30 секунд до 20 минут.
5. Вышеперечисленные действия повторяются либо для судна с другими параметрами (например, с измененной нагрузкой или курсом), либо для морского волнения с другими параметрами (например, с другой частотой пика спектра или параметром формы углового распределения).

Под задачей подразумевается совокупность функций, вызов которых должны быть осуществлен в определенные моменты времени. В процессе проведения экспериментов были выявлены следующие требования к системе задач:

1. Возможность запуска задачи в заданный момент времени.
2. Возможность вызова функции в момент запуска задачи.
3. Возможность вызова функции в момент завершения задачи.
4. Возможность вызова функции с определенным интервалом.
5. Возможность вызова функции на каждом шаге моделирования.
6. Возможность параллельного исполнения задач (функции являются атомарными).
7. Возможность удобного составления расписания.

Реализованная система задач функционирует следующим образом:

1. Задаются функции `init_func`, `term_func`, `frame_func`, `tick_func`, которые будут вызваны соответственно в момент создания задачи, завершения задачи, на каждом шаге моделирования и с заданным интервалом (на каждом «тике»).
2. Задаются время запуска задачи, время работы задачи и интервал между «тиками».
3. Создается таймер запуска задачи.
4. В момент срабатывания таймера запуска задачи создается задача. Таймер запуска задачи уничтожается.
5. В момент создания задачи создаются три таймера, каждый из которых отвечает за:
  - (a) Вызов функции с заданным интервалом.
  - (b) Вызов функции на каждом шаге моделирования.
  - (c) Завершение задачи.
6. После создания таймеров вызывается функция `init_func`.
7. По завершению задачи вызывается функция `term_func` и все таймеры, созданные для этой задачи уничтожаются.

Система задач предоставляет две функции:

- `tasks.run()` - непосредственный запуск задачи. Принимает в качестве параметра Lua-таблицу — дескриптор задачи, в котором хранятся время выполнения задачи, интервал между «тиками», а также функции `init_func`, `term_func`, `frame_func` и `tick_func`. Возвращает абсолютное время завершения задачи.
- `tasks.run_at()` - отложенный запуск задачи. Принимает время запуска задачи и Lua-таблицу — дескриптор задачи. Возвращает абсолютное время завершения задачи.

Пример составления расписания задач представлен ниже:

Listing 3.4: Пример создания расписания задач

---

```
local tt1, tt2 = 0, 0;

for i=1, 10 do
    tt1 = tasks.run_at( tt1+1, x_drift_task(i, 1) );
```

```

tt1 = tasks.run_at( tt1+1,  x_drift_task(i, 2) );
tt1 = tasks.run_at( tt1+1,  x_drift_task(i, 4) );
tt1 = tasks.run_at( tt1+1,  x_drift_task(i, 8) );
end

for i=1, 16 do
    tt2 = tasks.run_at( tt2+1,  x_logging_task(i, 1) );
end

```

---

Вышепредставленный листинг демонстрирует создание расписания из 40 последовательно задач `x_drift_task` (функция, которая конструирует дескриптор задачи) и 16 последовательных задач `x_logging_task`, которые будут выполняться параллельно.

Следует отметить, что система задач реализована полностью на языке Lua, затрагивать C++ код необходимости не было.

### 3.2.4 Объект «Корабль»

Центральным объектом виртуального полигона для задач моделирования экстремальной динамики морских объектов является судно, которое реализовано как сущность `ship`. Данная сущность обеспечивает следующие возможности:

- Гибко настраивать параметры судна.
- Осуществлять численное моделирование поведения судна на морском волнении в соответствии с моделью, описанной в разделе 2.2 в реальном времени.
- Визуализировать модель судна, объективно отражая текущее положение судна в пространстве.
- Отправлять команды управления судну.
- Получать текущие параметры судна в последующей возможностью записи в журнал.

На данный момент существует возможность задавать следующие атрибуты в момент создания судна:

- Геометрическую модель для расчета гидростатических и гидродинамических сил и моментов.

- Геометрическую модель для расчета момента инерции и отслеживания коллизий.
- Геометрическую модель для визуализации.
- Координаты центра тяжести относительно низшей точки форштевня судна. Задание координат центра тяжести судна позволяет изменять метацентрическую высоту и виртуально менять расположение грузов.
- Поправочный коэффициент к момент инерции. Поправочный коэффициент позволяет виртуально изменить расположение груза на судне.
- Весовое водоизмещение судна.
- Общий коэффициент гидродинамического сопротивления.
- Плотность расположения точек при численном интегрировании.
- Коэффициенты масштабирования размеров судна. Позволяет изменить размеры судна сохраняя при этом геометрию формы.
- Расположение абстрактного «винта» — точка приложения буксировочной силы.
- Начальное положение (**p**) в пространстве и текущие курс и углы крена и дифферента( $\phi, \theta, \psi$ ).

Геометрические модели, используемые для моделирования динамики судна представлены на рис. 3.2.

Для задач исследования динамики судна представляются следующие команды:

- `set_propulsion` — устанавливает буксировочную силу (в ньютонах) и угол, под которым она приложена
- `get_dynamics` — возвращает Lua-таблицу, в которой находится следующие данные:
  - Суммарные сила и момент, действующие на судно.
  - Текущее положение в пространстве, курс и углы крена и дифферента.
  - Текущая скорость.

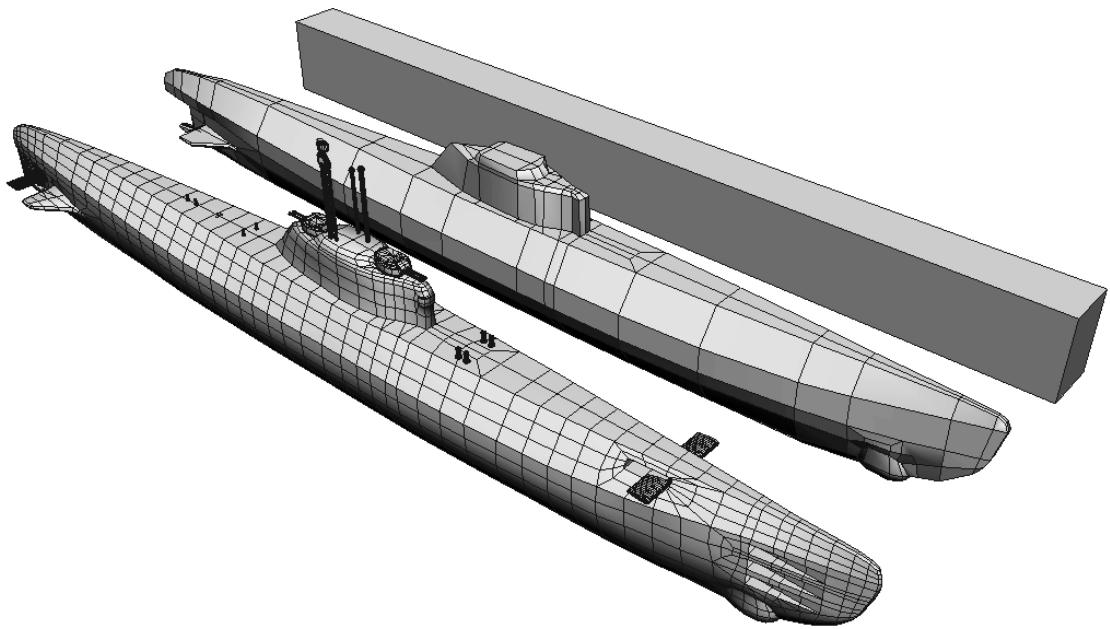


Рис. 3.2: Полигональные сетки, используемые для моделирования динамики судна. Слева направо: модель для визуализации, модель для гидростатических и гидродинамических расчетов, модель для расчета моментов инерции и коллизий.

- Высота волны в точке, где находится центр тяжести судна.

Хранимые в таблице данные в дальнейшем можно записывать в файл (это позволяет стандартная библиотека Lua) с последующим анализом, в том числе и с использованием пакетов математических программ, таких как Scilab, Matlab и др.

- `update_forces` — обновляет гидростатические и гидродинамические силы в соответствии с текущим положением судна и характеристиками морского волнения в точке. Данная команда используется для определения статических характеристик судна, например для построения ДСО.
- `apply_forces` — применяет заданную силу в заданной точке. Данная команда может быть полезна для моделирования периодически возникающих нагрузок, например подъем грузов.
- `set_pose` — форсированно выставляет текущие положение в про-

пространстве, курс и углы крена и дифферента.

- `get_pose` — возвращает текущие положение в пространстве, курс и углы крена и дифферента.
- `show_forces` — показывает распределение сил, действующих на судно.

### 3.2.5 Типовой статический эксперимент: построение ДСО, определение метацентрической высоты.

Диаграмма статической остойчивости (ДСО, или диаграмма Рида) представляет собой диаграмму зависимости восстанавливающего момента (или плеча момента) от угла крена. Построение ДСО является типовой задачей при проведении экспериментов по расчету динамики судна на морском волнении.

ДСО строится следующим образом:

1. Параметры волнения выставляются равными 0, что соответствует тихой воде.
2. Создается судно с заданными параметрами.
3. Судно полностью затапливается (используется команда `set_pose`).
4. Бинарным поиском находится вертикальная координата судна, при которой вес и выталкивающая сила уравновешиваются (их можно получить, используя команду `get_dynamics`). Начальное значение момента (равен нулю, если судно не повреждено) и угла крена (равен нулю) записываются в файл. Полученная вертикальная координата может также являться характеристикой посадки судна на тихую воду.
5. Принудительно изменяется угол крена (используется команда `set_pose`). Бинарным поиском находится вертикальная координата судна, при которой вес и выталкивающая сила уравновешиваются. Обновляются значения сил, действующих на судно (используется команда `update_forces`). Значение момента (равен нулю, если судно не повреждено) и угла крена (равен нулю) записываются в файл.
6. Шаг №3 повторяется для всего интересующего диапазона углов крена.
7. Судно возвращается в исходную точку.

Пример результата расчета ДСО представлен на рис. 2.10. Наличие неровностей на графике ДСО обусловлено случайностью расположения точек на поверхности корабля. Производная ДСО в нулевой точке соответствует начальной метацентрической высоте.

### **3.2.6 Типовой динамический эксперимент: качка на тихой воде.**

Важнейшей характеристикой судна является частоты собственных колебаний. Для определения частот собственных колебаний судна, а также определения коэффициентов затухания выполняется виртуальное кренивание. Для этого необходимо выполнить следующие действия:

1. Параметры волнения выставляются равными 0, что соответствует тихой воде.
2. Создается судно с заданными параметрами.
3. Строится диаграмма бортовой качки:
  - (a) Величина крена выставляется равной малой не нулевой величине (порядка 5–10 градусов).
  - (b) Создается таймер, который через заданный интервал времени остановит процесс моделирования (порядка 30–150 секунд, в зависимости от размеров судна).
  - (c) Создается таймер, который с заданными интервалом запрашивает текущие характеристики судна. Запись осуществляется с интервалом 0.1–0.5 секунды.
4. Строится диаграмма килевой качки:
  - (a) Величина дифферента выставляется равной малой не нулевой величине (порядка 3–5 градусов).
  - (b) Создается таймер, который через заданный интервал времени остановит процесс моделирования (порядка 30–150 секунд, в зависимости от размеров судна).
  - (c) Создается таймер, который с заданными интервалом запрашивает текущие характеристики судна. Запись осуществляется с интервалом 0.1–0.5 секунды.
5. Строится диаграмма вертикальной качки:

- (a) Величина возвышения судна выставляется равной малой не нулевой величине (порядка 0.1 осадки).
- (b) Создается таймер, который через заданный интервал времени остановит процесс моделирования (порядка 30–150 секунд, в зависимости от размеров судна).
- (c) Создается таймер, который с заданными интервалом запрашивает текущие характеристики судна. Запись осуществляется с интервалом 0.1–0.5 секунды.

Результаты записи бортовой качки, и определения собственных периодов и частот колебаний представлена на рис. 2.11.

## 3.3 Графическая подсистема

### 3.3.1 Общая структура графической подсистемы

Графическая подсистема логически разделена на два уровня абстракции:

- Драйвер (driver).
- Сцена (scene).

Драйвер представляет собой слой абстракции от конкретного графического API. Таким образом, это позволяет внедрять новые графические API не затрагивая сцену. Основными сущностями драйвера, которыми он оперирует и предоставляет на уровень выше — сцене, являются:

- Эффект (Effect) — представляет собой совокупность состояний графического конвейера и набора из вершинного и пиксельного шейдеров.
- Вершинный буфер (Vertex buffer) — представляет собой совокупность из набора массива вершин и массива индексов.
- Текстура (Texture) — двумерное (2D texture), трехмерное (Volume texture) или кубическое (Cube texture) изображение.
- Внешекранная поверхность (Render Target) — может быть использована как область, куда может осуществляться визуализация, а затем как двумерная текстура.

Как было отмечено выше, графическая подсистема позволяет отображать следующие виды объектов:

- Твердые объекты (Solids).
- Водная поверхность (Water).
- Отладочные линии (Debug lines).
- Элементы пользовательского интерфейса и текст.
- Источники света.

Для отображения твердых объектов используется технология Deferred Shading [72], [59]. Для закраски твердых объектов используется модель освещения Кука-Торренса, которая является физически обоснованной



Рис. 3.3: Построение теней от элементов надстройки корабля

[38] и дает наиболее реалистичные блики [62]. Детальное описание техники визуализации твердых объектов, построения теней и расчета освещения представлено в статье [21]. Пример построения теней представлен на рис. 3.3.

Для отображения элементов пользовательского интерфейса и текста используются списки четырехугольников с наложенными текстурами. Для отображения текста используются растровые шрифты, которые могут быть подготовлены из TrueType или OpenType шрифтов с использованием утилиты Bitmap Font Generator [93].

Для отображения отладочной информации графическая система предоставляет функциональность по рендерингу трехмерных отладочных линий, а также следующих объектов, составляемых из линий:

- Стрелки (варьируются цвет, длина и форма наконечника)

- Точки (изображаются как три взаимно-пересекающихся отрезка, варьируются размер и цвет)
- Ориентированные по осям проволочные параллелепипеды (варьируются размер и цвет)

Отладочные линии, а также их составные из линий объекты могут использованы для визуализации такой информации как:

- Силы и моменты, действующие на судно.
- Линии тока.
- Траектории движения и графики.

На рис. 3.4 представлен пример отладочной визуализации и текста.

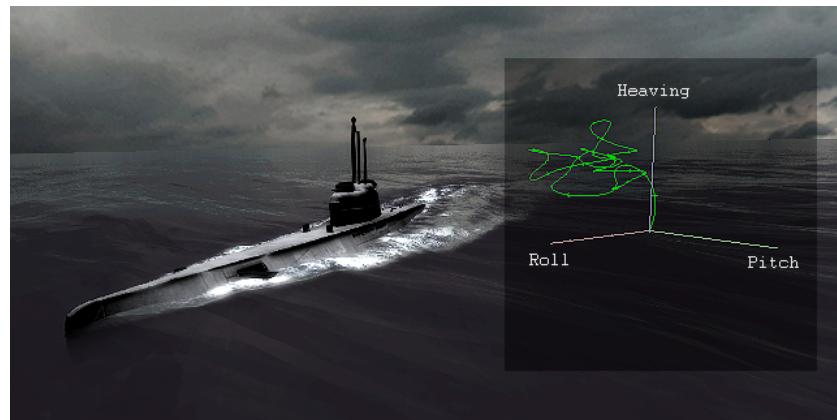


Рис. 3.4: Отладочная визуализация и текст

### 3.3.2 Морфологическое сглаживание ступенчатости изображения

В широкоэкраных системах ВР остро встает проблема «ступенчатости» изображений, которая обусловлена конечным размером пикселя. Например, для экрана системы ВР ЦСМВ СПбГУ ИТМО размер пикселя при разрешении 1920x1080 будет составлять около 2 мм, что визуально ощущимо на небольшом расстоянии от экрана.

Для того, чтобы избавиться от этого эффекта и сделать изображение более реалистичным, используются специальные техники сглаживания.

На данный момент существует два наиболее часто используемых метода сглаживания: избыточная выборка сглаживания (англ. Super Sampling anti-aliasing, SSAA) и множественная выборка сглаживания (англ. Multisample anti-aliasing, MSAA). Метод SSAA заключается в том, что вначале синтезируется изображение, в несколько раз превосходящее по размерам финального изображение, после чего это изображение сжимается до размеров финального. При этом происходит усреднение всех соседних пикселей. В результате работы SSAA получается наиболее качественное изображение, но данный метод крайне требователен к производительности системы и к её памяти. В случае визуализации стереоизображения эти требования возрастают в два раза, что является мало приемлемым. Метод MSAA аналогичен SSAA с той лишь разницей, что расчет цвета пикселя осуществляется один раз и записывается сразу в несколько субпикселей.

Следует отметить, что необходимость использования сглаживания и синтеза изображения высокого разрешения, а также синтез парных изображений (для создания эффекта стерео) ставит ограничение на возможность использования SSAA и MSAA, так как сильно возрастает объем памяти необходимый для буфера изображения. В связи с такими ограничениями было решено использовать метод морфологического сглаживания (англ. Morphological Antialiasing, MLAA)[66]. MLAA работает со сценами любой сложности и с любой техникой. Фактически данный метод работает только с финальным изображением, он не настолько требователен к объему памяти как вышеперечисленные методы, а результат в большинстве случаев не уступает результату работы метода SSAA.

Данный метод заключается в нахождении „L“-образных форм на «ступенчатых» разрывах непрерывности и их размытии. Метод MLAA можно условно разделить на три этапа:

1. На первом этапе находятся все разрывы непрерывности в изображении, точность на этом этапе можно повысить благодаря использованию Z-буфера. На этом этапе можно применить любой метод нахождения разрывов непрерывностей (граней, ребер) из области компьютерного зрения.
2. На втором этапе рассчитывается длина найденных непрерывностей, это необходимо для расчета уровня сглаживания пикселей.
3. На третьем этапе происходит поиск всех „L“-образных форм и их сглаживание.

На рис. 3.5 приведен пример синтезированного изображения без сглаживания и с использованием метода MLAA.

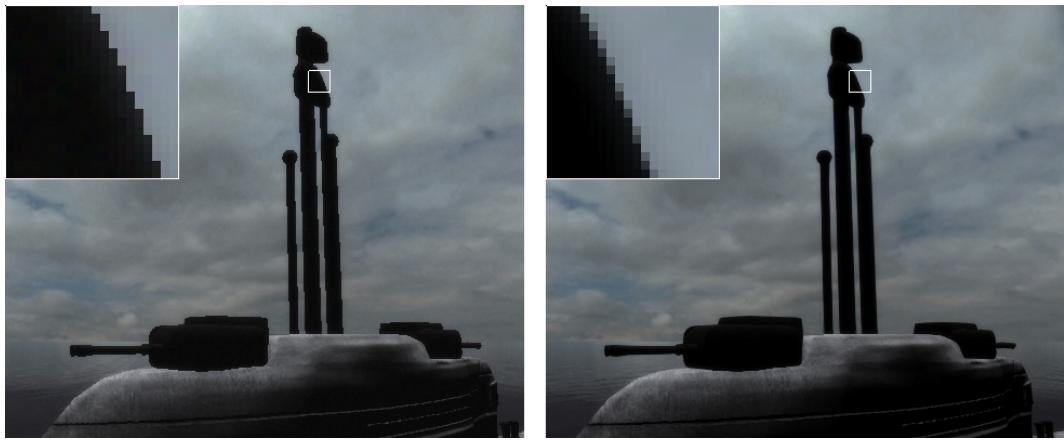


Рис. 3.5: Результат применения морфологического сглаживания

### 3.3.3 Технология отображения морского волнения

Для создания эффекта присутствия необходимо отображать визуально бесконечную водную поверхность простирающуюся от точки наблюдения до горизонта. Для визуализации безграничного моря используются две основные техники:

1. Сетки в пространстве экрана (Screen space grids) [35].
2. Неравномерные сетки, привязанные к камере [57].

В ходе работы были реализованы оба варианта визуализации водной поверхности. Вариант с использованием неравномерных сеток привязанных к камере оказался более стабильным и с небольшими изменениями используется как основной. Для отображения используется сетка подготовленная особым образом (рис. 3.6). Сетка имеет следующую структуру:

- А - «дно» - используется для маркировки буфера трафарета при отображении раздела сред;
- В - «область волнения» - используется для отображения волн;
- С - «область горизонта» - область, которая находится достаточно далеко от наблюдателя и видимой высотой волн можно пренебречь.

Построение элементов сетки «А» и «С» — тривиально. Построение области «В» осуществляется следующим образом:

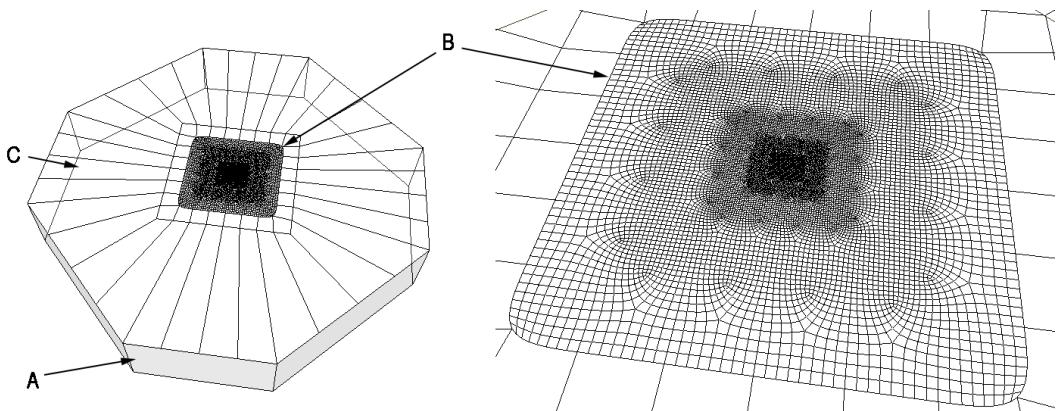


Рис. 3.6: Сетка для отображения морской поверхности. Слева – общая структура сетки, справа – сетка области интенсивного волнения (обозначения – по тексту)

1. Строится сетка, состоящая из 16 квадратов ( $4 \times 4$ ).
2. Четыре центральных квадрата разбиваются еще на 4 квадрата каждый.
3. Шаг №2 повторяется 5-6 раз.
4. К полученной сетке применяется алгоритм сглаживания полигональных сеток Катмулла-Кларка [41].

Полученная таким образом сетка обладает преимуществом перед сетками составленным из квадратных патчей. Преимущество заключается в сглаживании границы перехода между более детальным и менее детальным участком сетки.

При визуализации морской поверхности центр сетки всегда находится под или над камерой. Поворот камеры на ориентацию сетки в пространстве не влияет. Высота вершин в области «В» модифицируется вершинным шейдером на GPU в соответствии с моделью волнения. При этом высота волн плавно уменьшается по мере увеличения расстояния от наблюдателя. Карта высот волн, построенная с использованием FFT на CUDA, записывается в текстуру (этот процесс осуществляется полностью на GPU). Полученная текстура используется вершинным шейдером для модификации высоты вершин. Для эффекта отражения Френеля необходимо знать значение нормали в каждой точке. Для этого карта высот волн сэмплируется в нескольких точках и нормаль находится методом конечных разностей.

При закрашивании водной поверхности учитывается частичное отражение Френеля (только небо, которое задается панорамной текстурой), и частичное преломление с экспоненциальным затуханием по глубине. См. рис. 3.7.



Рис. 3.7: Визуализация поверхности воды: отражение Френеля (слева), экспоненциальное затухание с глубиной (справа).

Следует отметить, что камера может находиться не только над водой, но и под водой, а также на границе сред. Для корректного отображения границы сред используется следующая техника:

1. При визуализации морской поверхности включается запись в буфер трафарета: каждый раз растеризуется треугольник значение соответствующего бита в буфере трафарета инвертируется. Таким образом, если пиксель находится внутри сетки, то значение в буфере трафарета будет равно 1, если пиксель находится за пределами сетки, то значение в буфере трафарета будет равно 0.
2. Для всех пикселей, у которых значение в буфере трафарета равно 1 применяется эффект затуманивания.

Изображение, полученное при позиционировании камеры на границе, сред представлено на рис. 3.8.

Дополнительным аспектом отображения визуальных свойств водной поверхности является воспроизведение расходящихся корабельных волн при движении плавучего морского объекта. Поскольку нелинейная задача расчета корабельных волн в полной постановке является существенно более ресурсоемкой по сравнению с моделью ветрового волнения (2.3), для создания визуального эффекта используется упрощенная модель, основанная на решении линейного уравнения колебаний на регулярной сетке:

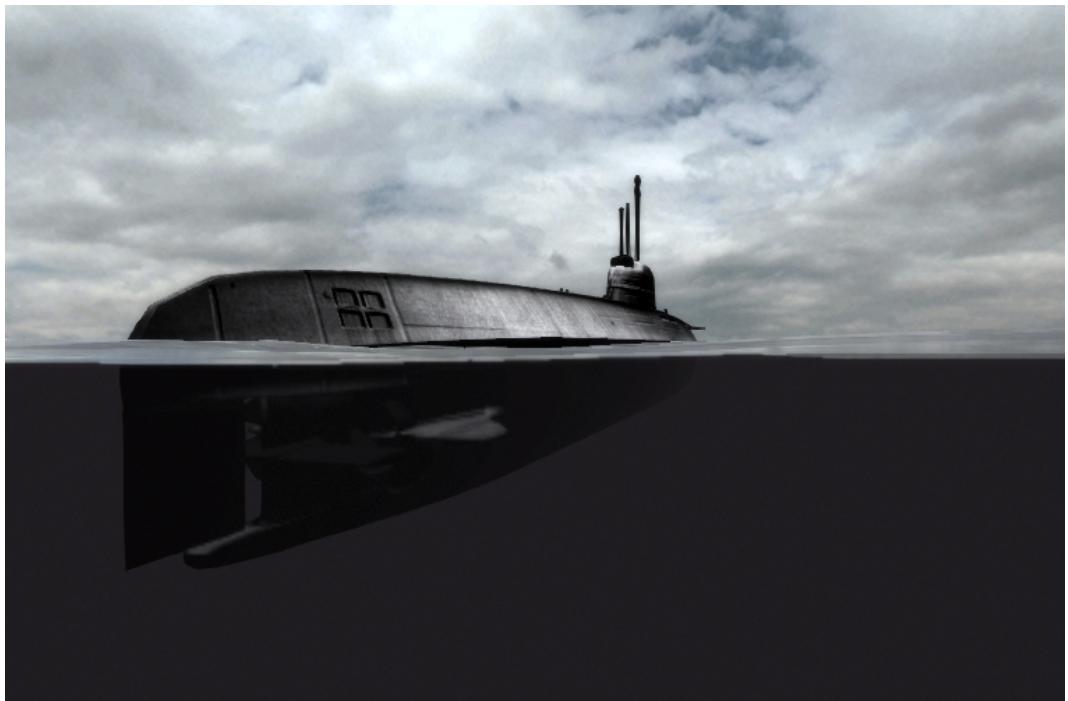


Рис. 3.8: Визуализация границы сред

$$\frac{d^2U}{dt^2} = \frac{d^2U}{dx^2} + \frac{d^2U}{dy^2} \quad (3.1)$$

Начальное возмущение формируется в точке пересечения корпуса корабля и водной поверхности. Величина возмущения определяется в зависимости от скорости поверхности корабля относительно воды. Уравнение решается на GPU с использованием библиотеки CUDA. Результат расчета как набор значений в текстуре передается в вершинный шейдер и высота колебаний добавляется к высоте волн. В тех областях, где скорость частиц колеблющейся поверхности выше определенного значения, поверхность моря перекрашивается в белый цвет, что дает эффект пены. См. рис. 3.9.

Корабельные волны в данной реализации являются только визуальным эффектом и на ход моделирования поведения судна не влияют.



Рис. 3.9: Корабельные волны

### 3.3.4 Расчет поля волнения с использованием CUDA

Расчет поля высот морской поверхности выполняется средствами CUDA. При этом на GPU на каждом кадре выполняются следующие шаги:

1. Вычисление спектра волнения для текущего кадра сдвигом фаз гармоник относительно начального спектра. Данная операция реализуется CUDA-ядром, каждый поток которого читает соответствующий ему элемент исходного спектра, вычисляет фазу данной гармоники в текущий момент времени (формула 2.6) и сохраняет полученный спектр в промежуточном буфере.
2. Затем по построенному спектру при помощи двумерного обратного преобразования Фурье строится текущая карта высот морской поверхности. Для этого используется библиотека cuFFT, входящая в состав NVIDIA CUDA toolkit. Результат записывается в буфер памяти, разделяемый между CUDA и OpenGL, чтобы можно было скопировать их в текстуру для визуализации.
3. Полученная карта высот копируется в память CPU для расчета динамики судна.
4. Рассчитывается очередная итерация модели корабельных волн. Для этого методом конечных разностей решается уравнение 3.1. Высота

волны в каждой ячейке решетки явным образом выражается через результаты предыдущих итераций следующим образом:

$$\begin{aligned} h_{t+1}(\mathbf{p}) &= h_t(\mathbf{p}) + \alpha(h_t - h_{t-1}) + c^2 \Delta t^2 \nabla^2 h_t(\mathbf{p}) \\ \nabla^2 h_t(\mathbf{p}) &= \nabla^2 h_t(x, y) = h_t(x-1, y) + h_t(x+1, y) + h_t(x, y-1) \\ &\quad + h_t(x, y+1) - 4h_t(x, y) \end{aligned} \tag{3.2}$$

где  $c$  — скорость распространения поверхности волн,  $\alpha$  — коэффициент затухания.

Память видеоускорителя, хранящая карту высот корабельных волн на двух последних итерациях, разделяется между CUDA и OpenGL.

5. Полученные карты высот волнения и корабельных волн используются для визуализации морской поверхности. Для этого содержимое соответствующих буферов памяти GPU копируется в текстуры OpenGL, откуда читается вершинными и пиксельными шейдерами.

### 3.4 Развёртывание виртуального полигона на инфраструктуре ЦСМВ СПбГУ ИТМО

Разработанная система виртуального полигона адаптирована для использования в ЦСМВ СПбГУ ИТМО (далее — ЦСМВ). В состав ЦСМВ входит широкий ряд наименований аппаратных средств. Ниже приведен перечень только лишь тех аппаратных средств, которые непосредственно используются в процессе моделирования и визуализации:

- Шесть проекторов Roxar Projectiondesign с фильтрами круговой поляризации: три проектора формируют изображение для левого глаза, три — для правого.
- Две плазменные панели, на которые можно выводить информацию с дополнительных ПК. Виртуальный полигон не поддерживает вывод изображения на несколько мониторов<sup>3</sup>, однако на дополнительном ПК можно, например, запустить приложение, которое в реальном времени может считывать лог модельного процесса и строить графики различных параметров.

---

<sup>3</sup>Обусловлено особенностями реализации видео-выходов на видеокарте.

- Комплекс оборудования по коммутации и трансформации видео-сигналов: склейка, разрезание, картинка-в-картинке и т.д.
- Недеполяризующий экран обратной проекции.
- Программно-аппаратный комплекс управления аппаратными средствами ЦСМВ.
- Рабочая станция Hewlett-Packard Z800, оснащенная видеокартой NVidia Quadro FX 5800 — используется для численного моделирования и синтеза изображения.
- Рабочая станция Hewlett-Packard Z400, используется как вспомогательный компьютер.
- Рабочие места делегатов оснащенные коммутируемыми аудио- и видео-разъемами для подключения мобильных ПК.
- Мыши с шестью степенями свободы («3D-мыши») 3dconnexion SpacePilot Pro, реализует приложение внешних сил и моментов, таких как моменты крена, дифферента и рысканья, а также изменения водоизмещения.

### 3.5 Выводы по главе 3

В третьей главе представлена архитектура программно-аппаратного комплекса виртуального полигона. Показываются основные особенности и возможности виртуального полигона. Описаны основные методы используемые при построении изображения моделируемых сцен. Приводится пример базовых численных статических и динамических экспериментов, таких как построение ДСО и качка на тихой воде.

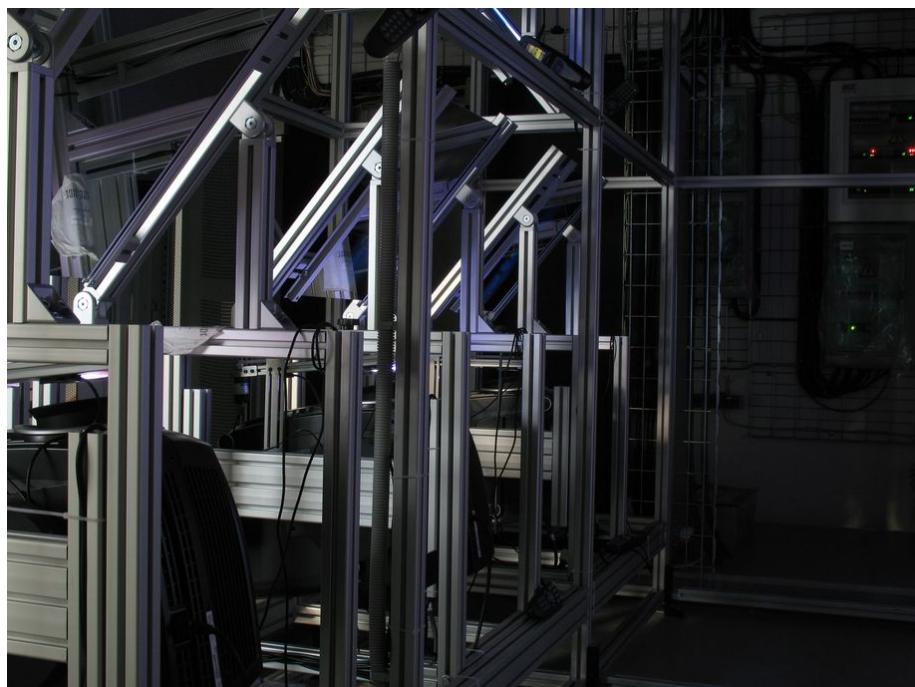
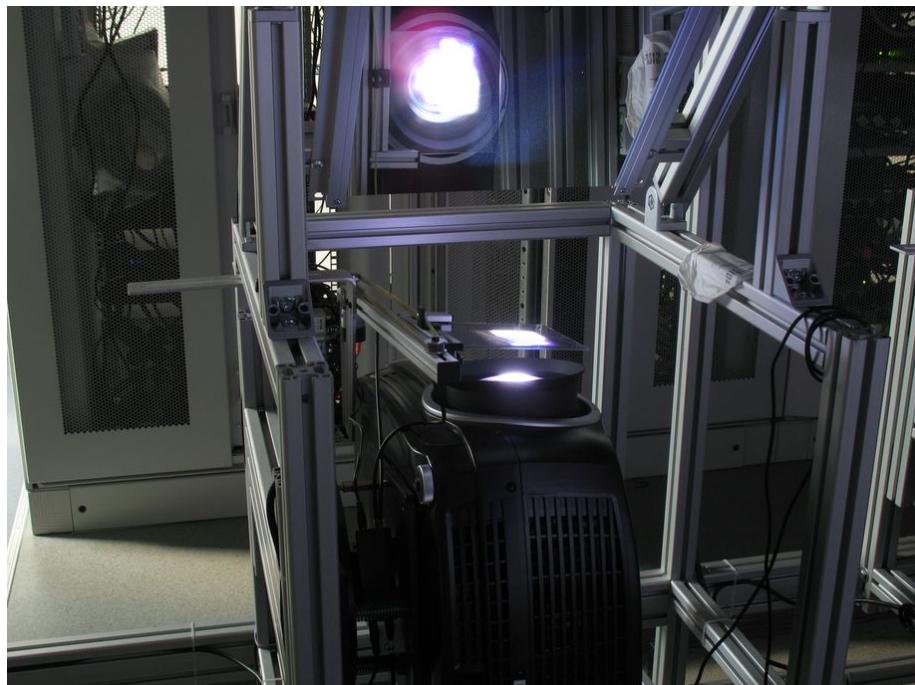


Рис. 3.10: Вид на один из шести проекторов (сверху), рама, на которой смонтированы все шесть проекторов (внизу)

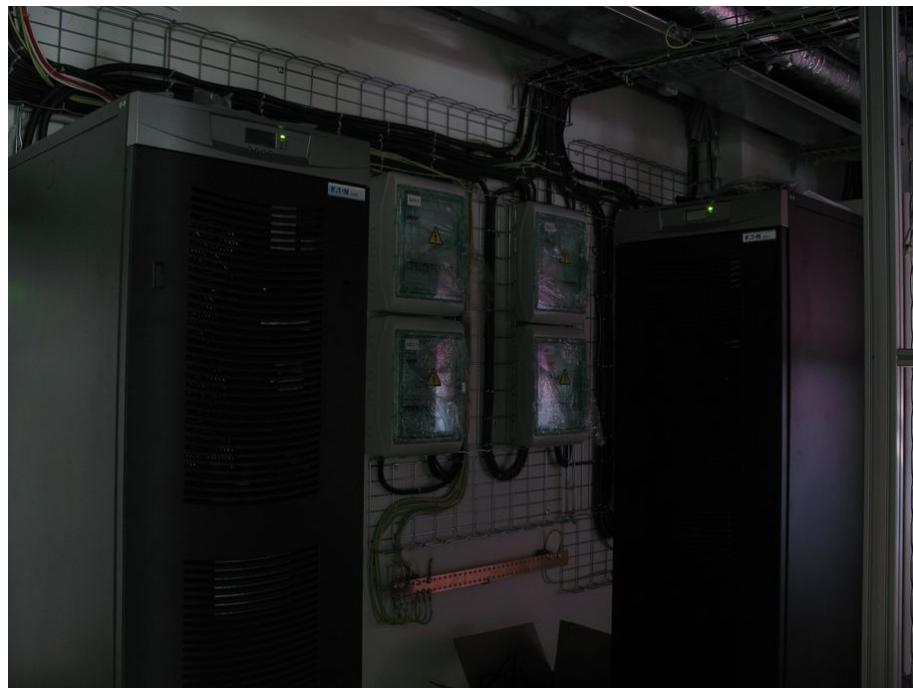
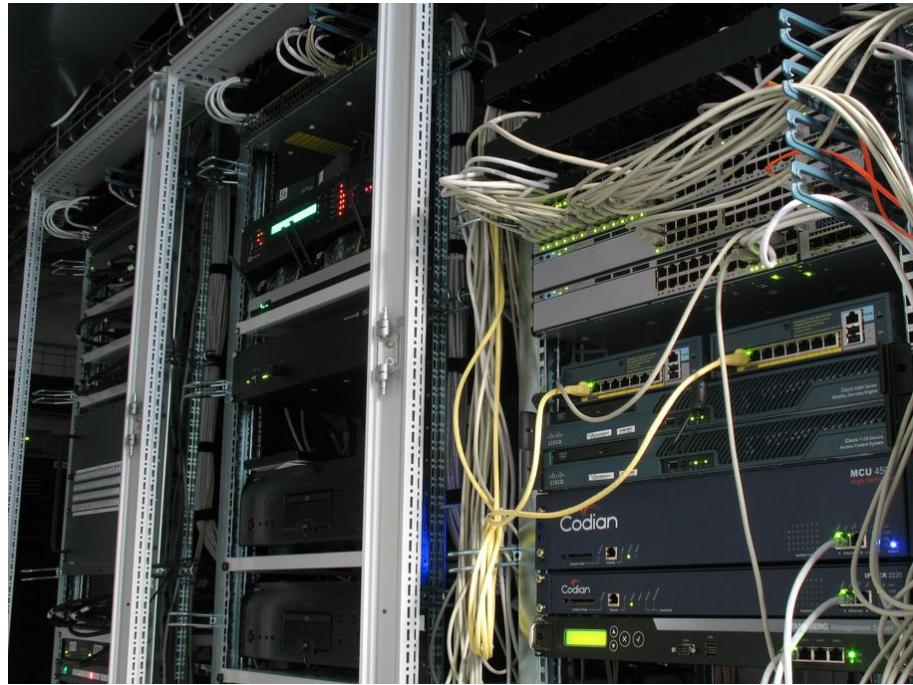


Рис. 3.11: Серверные стойки с оборудованием, источники бесперебойного питания



Рис. 3.12: Видео-процессоры, 3D-мышь



Рис. 3.13: Общий вид на главный экран ЦСМВ в процессе численного моделирования

## Глава 4

# Применение виртуального полигона для воспроизведения экстремальных ситуаций

## 4.1 Режим основного резонанса

Основной резонанс качки судна является, одним из основных классов экстремальных явлений, связанных с интенсивными колебаниями в одной из плоскостей. Сама по себе сильная качка в большинстве случаев не является угрожающей для судна; но она оказывается на обитаемости и на эксплуатационных характеристиках. Однако нахождение судна в режиме основного резонанса может стать причиной возникновения цепочки неблагоприятных последствий. Например, при сильной бортовой качке малого судна возможно резкое ухудшение остойчивости при попадании воды в палубный колодец, при килевой качке – сильный слеминг и пр. Избежать резонансных условий позволяет изменение скорости и (или) курса судна, осуществляющееся обычно посредством операционной диаграммы. В данном разделе воспроизведение резонансных режимов качки рассматривается как базовый тест на работоспособность виртуального полигона.

### 4.1.1 Цель и постановка эксперимента

**Условием** основного резонанса является совпадение частот собственных колебаний судна и частоты пика спектра волнения:  $\omega_{roll} \approx \omega_{max}$ .

**Целью** эксперимента является исследование влияние направленности волнения на возникновение резонанса и определение диапазона частот, опасных для судна.

Для проведения эксперимента используется модель судна класса «буксир» со следующими характеристиками:

- $L = 20$  м
- $B = 7$  м
- $T = 2$  м
- $D = 120\ 000$  кг

Эксперимент состоит из следующих этапов:

1. Определение частот собственных колебаний судна  $\omega_{roll}, \omega_{pitch}, \omega_{heave}$  путем кренования на тихой воде.
2. Выбирается набор параметров внешних условий вида  $(m, \omega_{max})$ , для которых проводятся записи качки судна в течение 120 секунд.

3. Этап № 2 проводится для всех значений  $m$  и  $\omega_{max}$

$$m \in \{2, 8, 32, 128, 512\}$$

$$\omega \in [0.8..3.0], \Delta\omega = 0.1 \text{ рад/с}$$

#### 4.1.2 Анализ результатов эксперимента

Согласно результатам эксперимента были получены следующие частоты собственных колебаний (временные диаграммы качки показаны на рис. 4.1):

- $\omega_{roll} = 1.75 \text{ рад/с}$
- $\omega_{pitch} = 2.15 \text{ рад/с}$
- $\omega_{heave} = 2.87 \text{ рад/с}$

Для всех параметров морского волнения определяется 10 %-ная обеспеченность (90 %-ная квантиль) модуля угла бортовой качки и делится на корень общей энергии волнения. График данного соотношения в зависимости от частоты пика спектра волнения и параметра формы углового распределения показан на рис. 4.2 и рис. 4.3 (аппроксимированные данные).

Для аппроксимации данных воспроизведения резонансных явлений следует выбрать функцию, которая удовлетворяет следующим требованиям:

- функция должна иметь пик заданной высоты для заданной резонансной частоты;
- функция должна иметь параметр формы, который задает ширину полосы пропускания и характеризующий энергетические потери.

Подходящей функцией является функция плотности распределением Коши (или функцию отклика), которую можно выразить следующим образом:

$$R(\omega) = \frac{A\Delta\omega^2}{(\Omega - \omega)^2 + \Delta\omega^2} = \frac{A \left( \frac{\Omega}{Q} \right)^2}{(\Omega - \omega)^2 + \left( \frac{\Omega}{Q} \right)^2} \quad (4.1)$$

$\omega$  — частота,  $\Omega_0$  — резонансная частота,  $A$  — пикивая амплитуда,  $\Delta\omega$  — полоса пропускания,  $Q$  — добротность, величина, показывающая соотношение запасенной энергии к потерям энергии на сопротивление.

Анализ резонансных явлений осуществляется путем аппроксимации экспериментальных данных функцией  $R(\omega)$  методом наименьших квадратов. Обработка результатов и построение графиков осуществляется пакетом Scilab [97].

На основании аппроксимации можно сделать выводы:

1. Параметр формы углового распределения значительно влияет на установившуюся амплитуду колебаний судна.
2. При увеличении значения формы углового распределения энергетические потери незначительно снижаются.

Как видно из графика (рис. 4.3) пик резонанса приходится на диапазон частот 1.75-1.90, что приближенно соответствует собственной частоте бортовой качки судна.

Снимок экрана ВП в процессе моделирования основного резонанса представлен на рис. 4.4.

Диаграмма бортовой качки ( $T_{roll} = 3.59$  с,  $\omega_{roll} = 1.75$  рад/с)

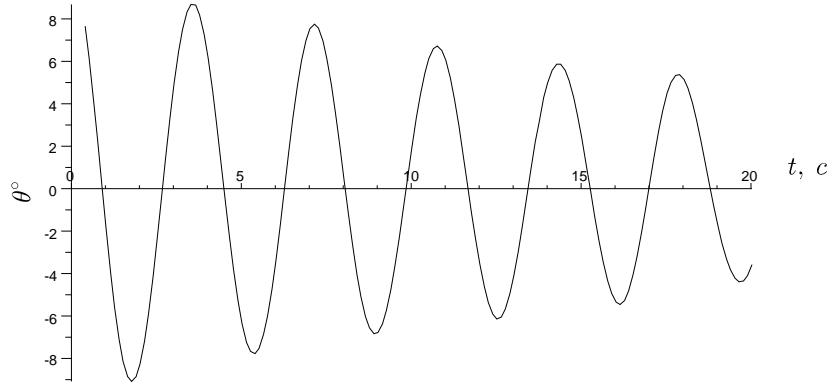


Диаграмма килевой качки ( $T_{pitch} = 2.93$  с,  $\omega_{pitch} = 2.15$  рад/с)

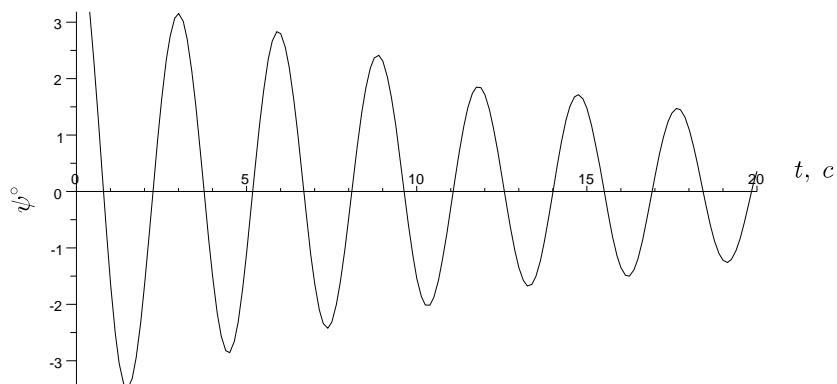


Диаграмма вертикальной качки ( $T_{heave} = 2.19$  с,  $\omega_{heave} = 2.87$  рад/с)

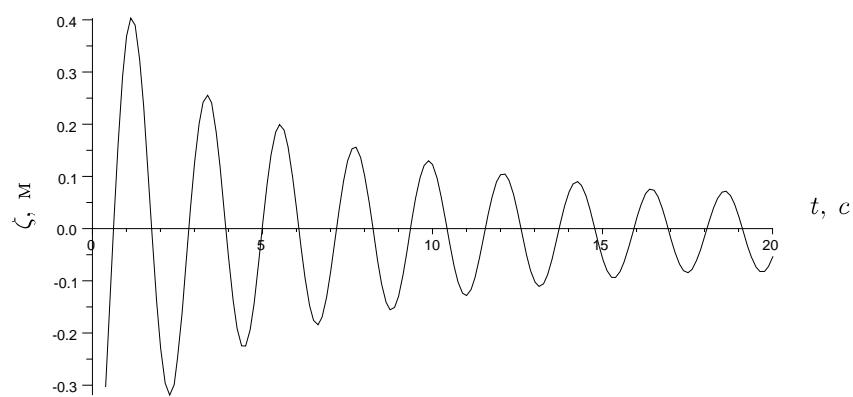


Рис. 4.1: Временные диаграммы бортовой, килевой и вертикальной качки

### Резонанс бортовой качки

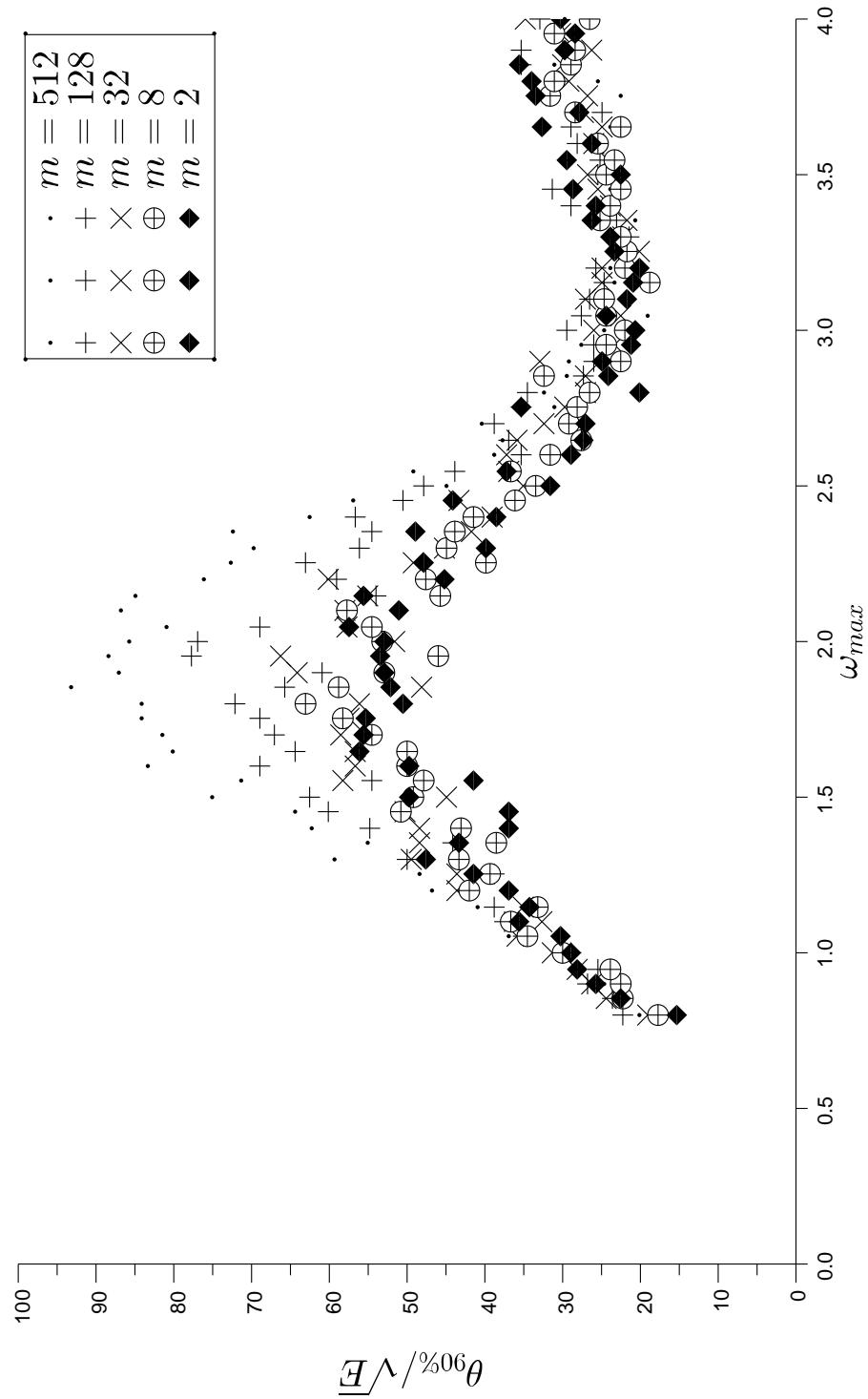


Рис. 4.2. Экспериментальные данные соотношения 10 %-ной обеспеченность модуля угла бортовой качки к энергии волнения

## Резонанс бортовой качки

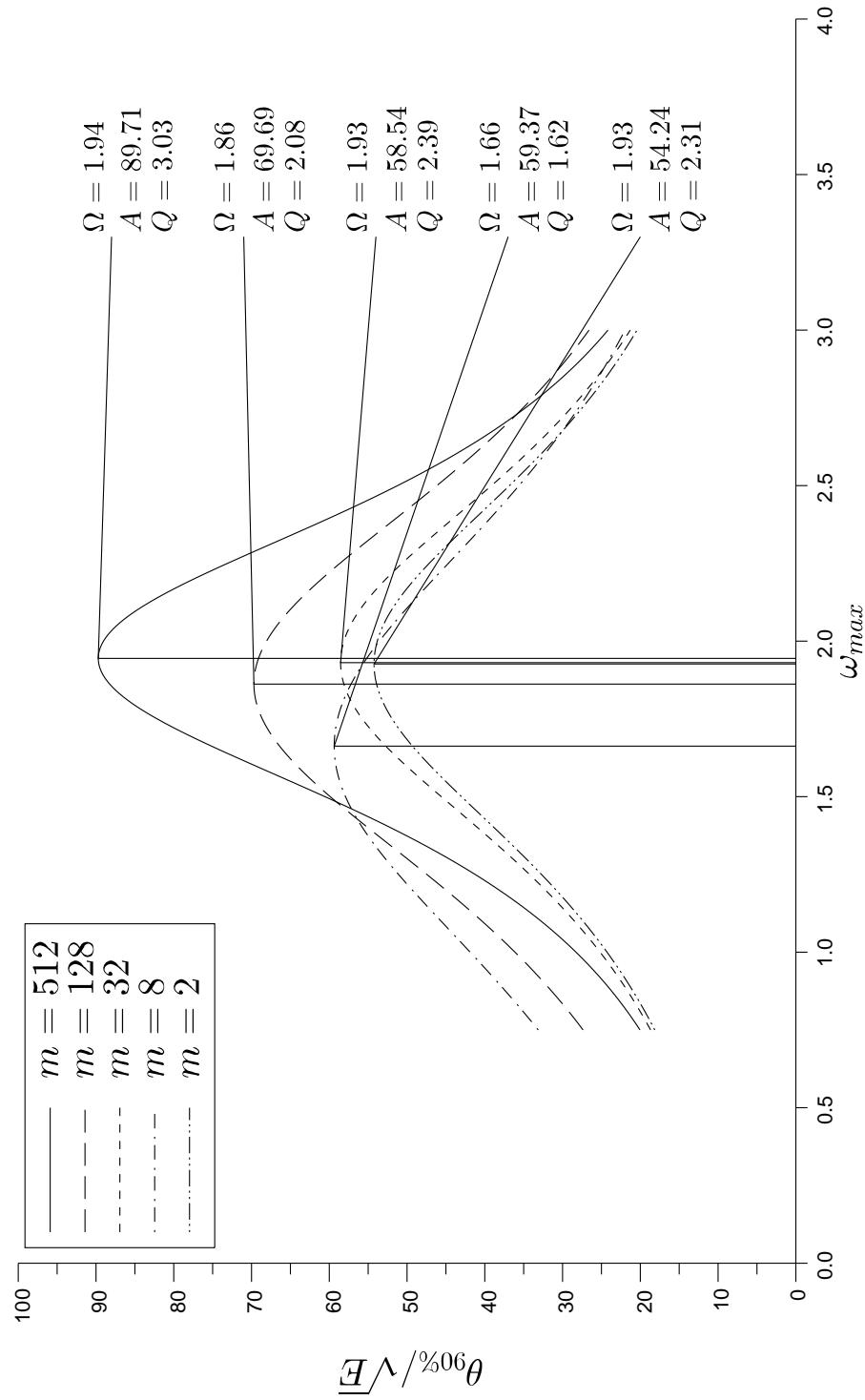


Рис. 4.3: Аппроксимация данных соотношения 10 %-ной обеспеченности модуля угла бортовой качки к энергии волнения и параметры функции отклика



Рис. 4.4: Снимок экрана ВП в процессе моделирования параметрического резонанса

## 4.2 Режим параметрического резонанса лагом к волне

Параметрический резонанс является одним из наиболее интересных явлений экстремальной динамики судна. Интерес обусловлен как редкостью явления, так и его опасностью. Одним из ярчайших примеров аварий вызванных параметрическим резонансом является авария контейнеровоза класса С11 водоизмещением более 150 000 тонн, при которой угол крена достигал  $40^\circ$  и, как следствие, было потеряно более  $2/3$  груза [47].

Параметрический резонанс обуславливается периодическим изменением характеристик остойчивости судна («валкость»), что, при совпадении частот изменения остойчивости судна и частоты собственных бортовых колебаний может привести к возникновению резонансу.

### 4.2.1 Цель и постановка эксперимента

**Условием** возникновение параметрического резонанса лагом к волне является периодическое изменение характеристик остойчивости судна обусловленное изменением осадки, которое может быть обусловлено вертикальной качкой. Если выполняется условие  $2\omega_{roll} \approx \omega_{heave} \approx \omega_{max}$ , то судно может попасть в режим параметрического резонанса.

**Целью** эксперимента является определение и сравнение опасных диапазонов частот морского волнения.

Для проведения эксперимента используется модель судна класса «каптер» со следующими характеристиками:

- $L = 40$  м
- $B = 12$  м
- $T = 3$  м
- $D = 600\ 000$  кг

Эксперимент состоит из следующих этапов:

1. Определение частот собственных колебаний судна  $\omega_{roll}, \omega_{pitch}, \omega_{heave}$  путем кренования на тихой воде.
2. Выбирается набор частот пика спектра волнения ( $m, \omega_{max}$ ), для которых проводятся запись качки судна в течение 900 секунд.
3. Этап № 2 проводится для всех значений  $\omega_{max}$   
 $\omega \in [0.8..3.0], \Delta\omega = 0.05$

### 4.2.2 Анализ результатов эксперимента

Согласно результатам эксперимента были получены следующие частоты собственных колебаний (временные диаграммы качки показаны на рис. 4.5):

- $\omega_{roll} = 1.14\text{c}^{-1}$
- $\omega_{pitch} = 3.25\text{c}^{-1}$
- $\omega_{heave} = 2.36\text{c}^{-1}$

Для всех параметров морского волнения определяется 10%-ная обеспеченность (90%-ная квантиль) модуля угла бортовой качки и делится на корень общей энергии волнения. График данного соотношения (исходные результаты) в зависимости от частоты пика спектра волнения показаны на рис. 4.6.

На графике присутствуют два вида резонанса:

- Основной — приходится на частоты 1.0..1.5.
- Параметрический — приходится на частоты 2.1..2.2.

На основании обработки экспериментальных данных можно сделать следующие выводы:

1. При параметрическом резонансе потери энергии весьма малы по сравнению с основным резонансом.
2. Судно, как колебательная система, при параметрическом резонансе обладает большей частотной избирательностью.

Снимок экрана ВП в процессе моделирования параметрического резонанса представлен на рис. 4.12.

Диаграмма бортовой качки ( $T_{roll} = 5.51$  с,  $\omega_{roll} = 1.14$  рад/с)

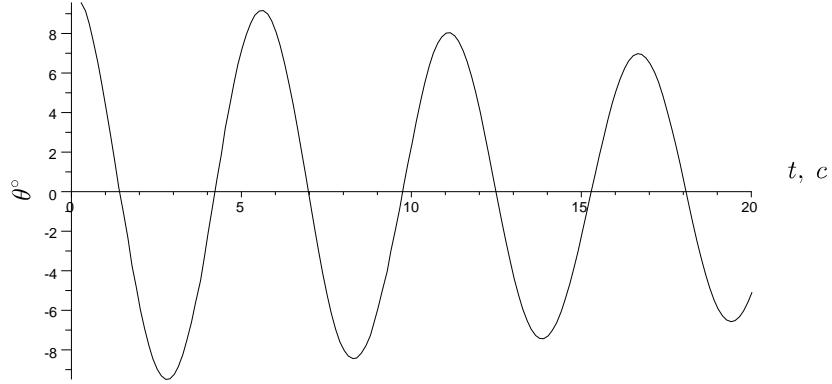


Диаграмма килевой качки ( $T_{pitch} = 1.93$  с,  $\omega_{pitch} = 3.25$  рад/с)

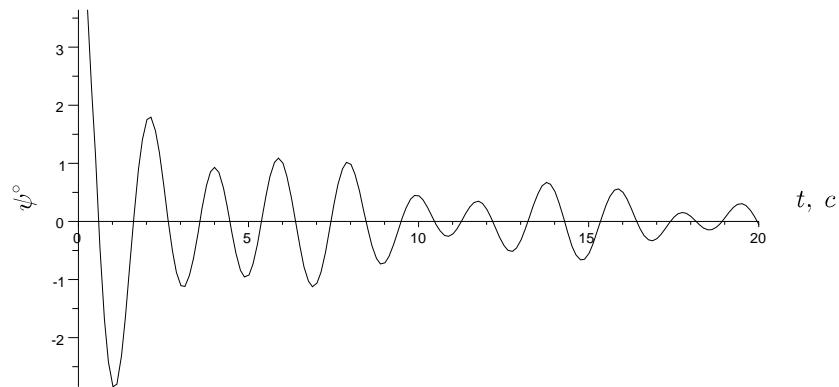


Диаграмма вертикальной качки ( $T_{heave} = 2.67$  с,  $\omega_{heave} = 2.36$  рад/с)

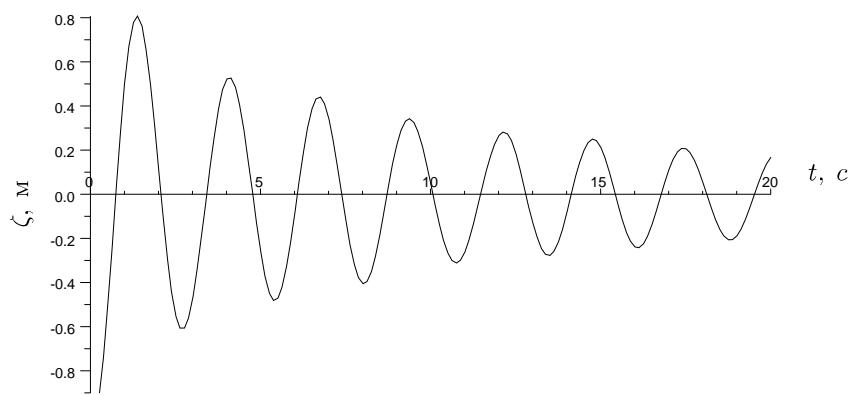


Рис. 4.5: Временные диаграммы бортовой, килевой и вертикальной качки.  
94

### Параметрический резонанс

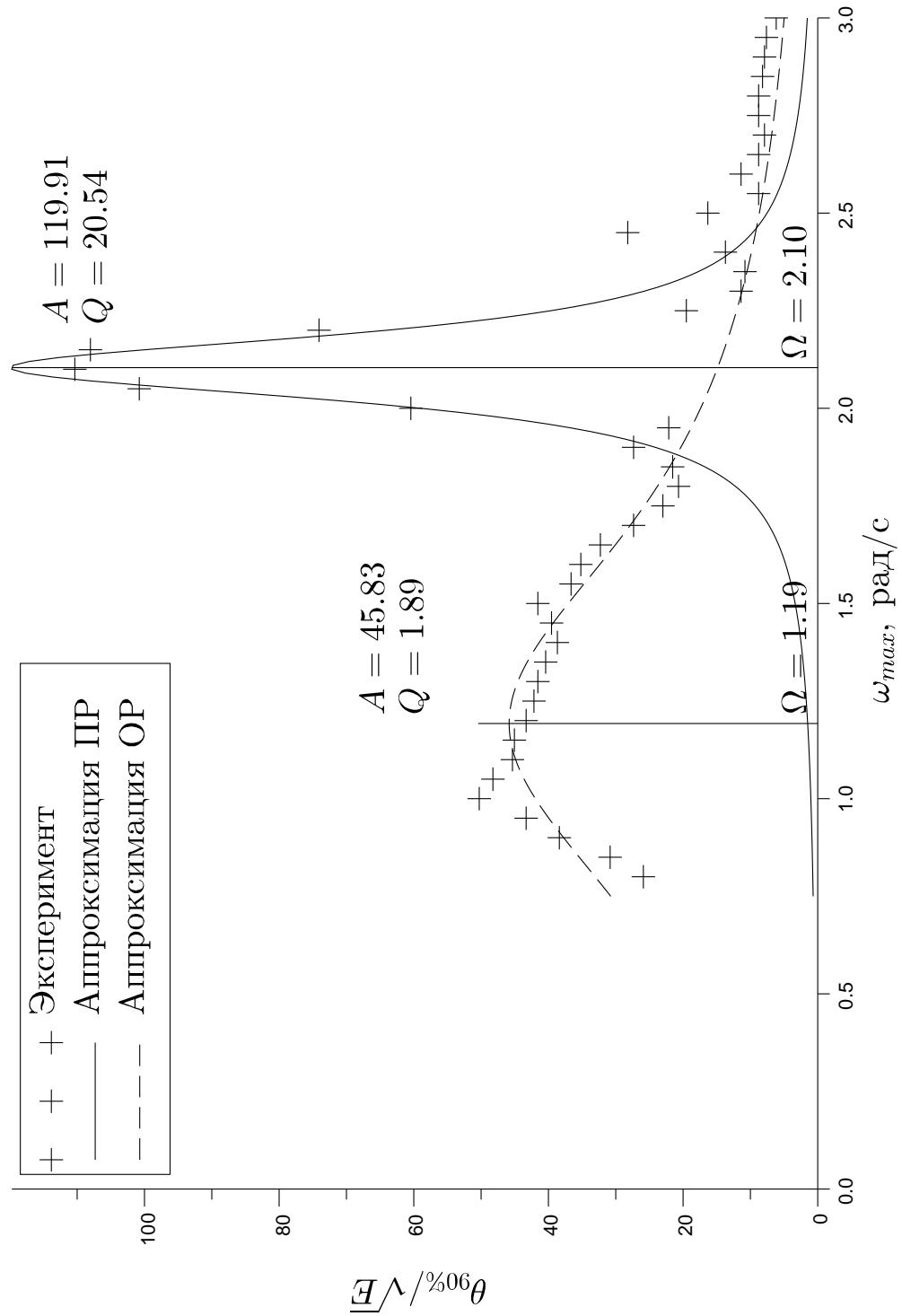


Рис. 4.6: Основной и параметрический резонанс бортовой качки



Рис. 4.7: Опасный крен вызванный параметрическим резонансом

## 4.3 Режим параметрического резонанса на встречном волнении

### 4.3.1 Цель и постановка эксперимента

**Условием** возникновения параметрического резонанса на встречном волнении является периодическое изменение характеристик остойчивости судна, вызванное прохождением судна через вершину и основание волны, размеры которой соизмеримы с размерами судна  $\lambda \approx L$ . В этом случае судно периодически оказывается то на вершине волны (остойчивость уменьшается), то на подошве (остойчивость увеличивается). Для возникновения резонанса необходимо, чтобы кажущаяся частота волн  $\omega_{\text{encounter}} \approx 2\omega_{\text{roll}}$ .

**Целью** эксперимента является определение ширины опасного диапазона скоростей судна на встречном волнении.

Для проведения эксперимента используется модель судна класса «каптер» со следующими характеристиками:

- $L = 40$  м
- $B = 12$  м
- $T = 3$  м
- $D = 600\,000$  кг

Для проведения эксперимента фиксируются следующие условия морского волнения, которые соответствуют 5-ти баллам по шкале Бофорта:

- $\omega_{\text{max}} = 1.2$  рад/с
- $\gamma = 6.0$
- $m = 64$

Для обеспечения заданной скорости корабля  $V$  и курса  $\phi$  (воздействие морских волн может привести к развороту судна) используется упрощенная модель автоматизированной системы управления. Если скорость меньше заданной, то буксировочная сила увеличивается, если больше — уменьшается. Если происходит отклонение от курса, то буксировочная сила прикладывается под углом к продольной оси судна, что приводит к возникновению крутящего момента и возврату судна на заданный курс.

Эксперимент состоит из следующих этапов:

1. Определение частот собственных колебаний судна  $\omega_{roll}$ ,  $\omega_{pitch}$ ,  $\omega_{heave}$  путем кренования на тихой воде.
2. Осуществляется численное моделирование качки судна для заданной скорости  $V$ , длительность моделирования равна 20 минутам.
3. Этап № 2 проводится для всех значений  $V$  в диапазоне 6.5..12 м/с,  $\Delta V = 1 \text{ м/с}$

### 4.3.2 Анализ результатов эксперимента

Согласно результатам эксперимента были получены следующие частоты собственных колебаний (временные диаграммы качки показаны на рис. 4.8):

- $\omega_{roll} = 1.23 \text{ рад/с}$
- $\omega_{pitch} = 2.34 \text{ рад/с}$
- $\omega_{heave} = 1.96 \text{ рад/с}$

Условие резонанса можно переписать как:

$$\omega_{encounter} = 2\omega_{roll} = \omega_{max} \left( 1 + \frac{V}{c_{max}} \right) \quad (4.2)$$

Так как  $c_{max} = g/\omega_{max}$ , то скорость, при которой возникает опасность резонанса  $V_{pr}$ , может быть выражена

$$V_{pr} = \frac{g}{\omega_{max}} \frac{2\omega_{roll} - \omega_{max}}{\omega_{max}} \quad (4.3)$$

Таким образом, скорость на которой ожидается возникновение резонанса равна  $V \approx 8.6 \text{ м/с}$ . Для каждой заданной скорости движения судна определяется 10 %-ная обеспеченность (90 %-ная квантиль) модуля угла бортовой качки. График зависимости 10 %-ной обеспеченности модуля угла бортовой качки в зависимости от скорости судна для заданного волнения показан на рис. 4.9.

Для аппроксимации данных в скоростной области перепишем выражение (4.1) следующим образом, подставив выражение кажущейся частоты волнения через скорость судна:

$$R(V) = \frac{A \left( \frac{\omega_{max}(1+V_{pr}/c_{max})}{Q} \right)^2}{\frac{(V_{pr}-V)^2 \omega_{max}^4}{g^2} + \left( \frac{\omega_{max}(1+V_{pr}/c_{max})}{Q} \right)^2} \quad (4.4)$$

где  $V_{pr}$  — резонансная скорость судна.

Предварительный анализ экспериментальных данных показал, что кривая резонанса несимметрична относительно резонансной скорости. На основании этого можно сделать, что судно ведет себя как нелинейная колебательная система.

Для аппроксимации экспериментальных данных преобразуем их следующим образом: пусть дан вектор скоростей  $\mathbf{V} = (V_1, V_2, \dots, V_N)$  и вектор значений 10%-ой обеспеченности модулей углов крена  $\Theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N)$ . Предположим, что  $h \sim \theta$ , тогда, так как  $\omega_{roll} \sim \sqrt{h}$  и  $V_{pr} \sim \omega_{roll}$ , то  $V_{pr} \sim \sqrt{\theta}$ .

Тогда для компенсации нелинейности преобразуем экспериментальные данные следующим образом:

$$\forall i \in [1..N] : \theta'_i = \theta_i \quad V'_i = V_i(1 + \gamma\sqrt{\theta_i}) \quad (4.5)$$

где  $\gamma$  — коэффициент нелинейности.

Пик резонанса приходится на значение  $V \approx 7.56$  м/с. Это соответствует кажущейся частоте, равной  $\omega_{encounter} = 2.30$  рад/с, и собственной частоте  $\omega_{roll} = 1.15$  рад/с, что меньше частоты, определенной в ходе кренования. Для выявления причины отклонения результатов численного моделирования проведем виртуальное кренование судна для больших углов бортовой качки ( $> 30$ ) (см. рис. 4.10). Как видно из рисунка, период полного колебания составляет  $T_{extreme} = 5.52$  с, что соответствует частоте  $\omega_{roll} = 1.14$  рад/с. Эта частота соответствует половине кажущейся частоты волнения, при которой было зафиксировано явления резонанса.

Снимок экрана ВП в процессе моделирования параметрического резонанса представлен на рис. 4.12.

Диаграмма бортовой качки ( $T_{roll} = 5.12$  с,  $\omega_{roll} = 1.23$  рад/с)

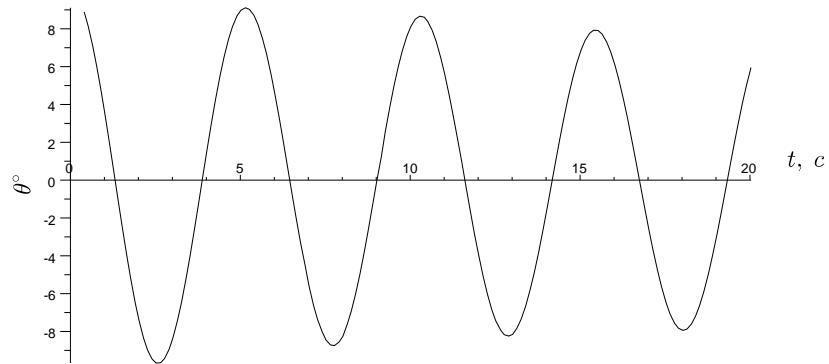


Диаграмма килевой качки ( $T_{pitch} = 2.69$  с,  $\omega_{pitch} = 2.34$  рад/с)

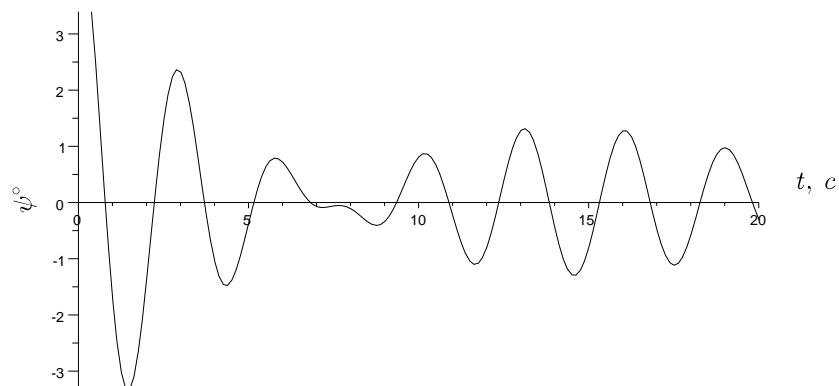


Диаграмма вертикальной качки ( $T_{heave} = 3.20$  с,  $\omega_{heave} = 1.96$  рад/с)

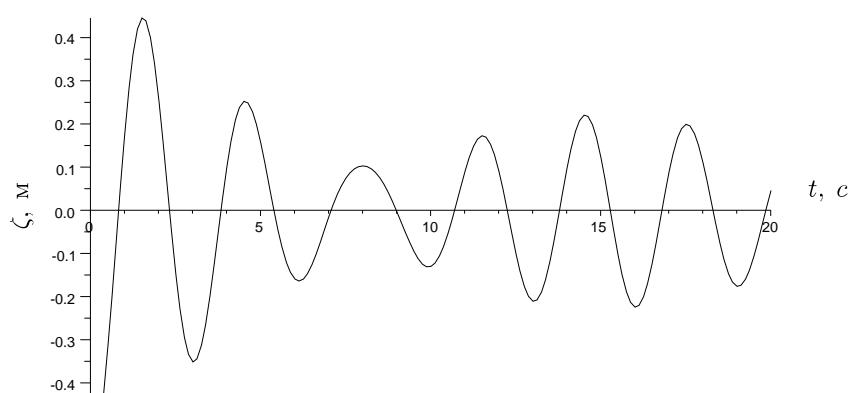


Рис. 4.8: Временные диаграммы бортовой, килевой и вертикальной качки.

### Параметрический резонанс

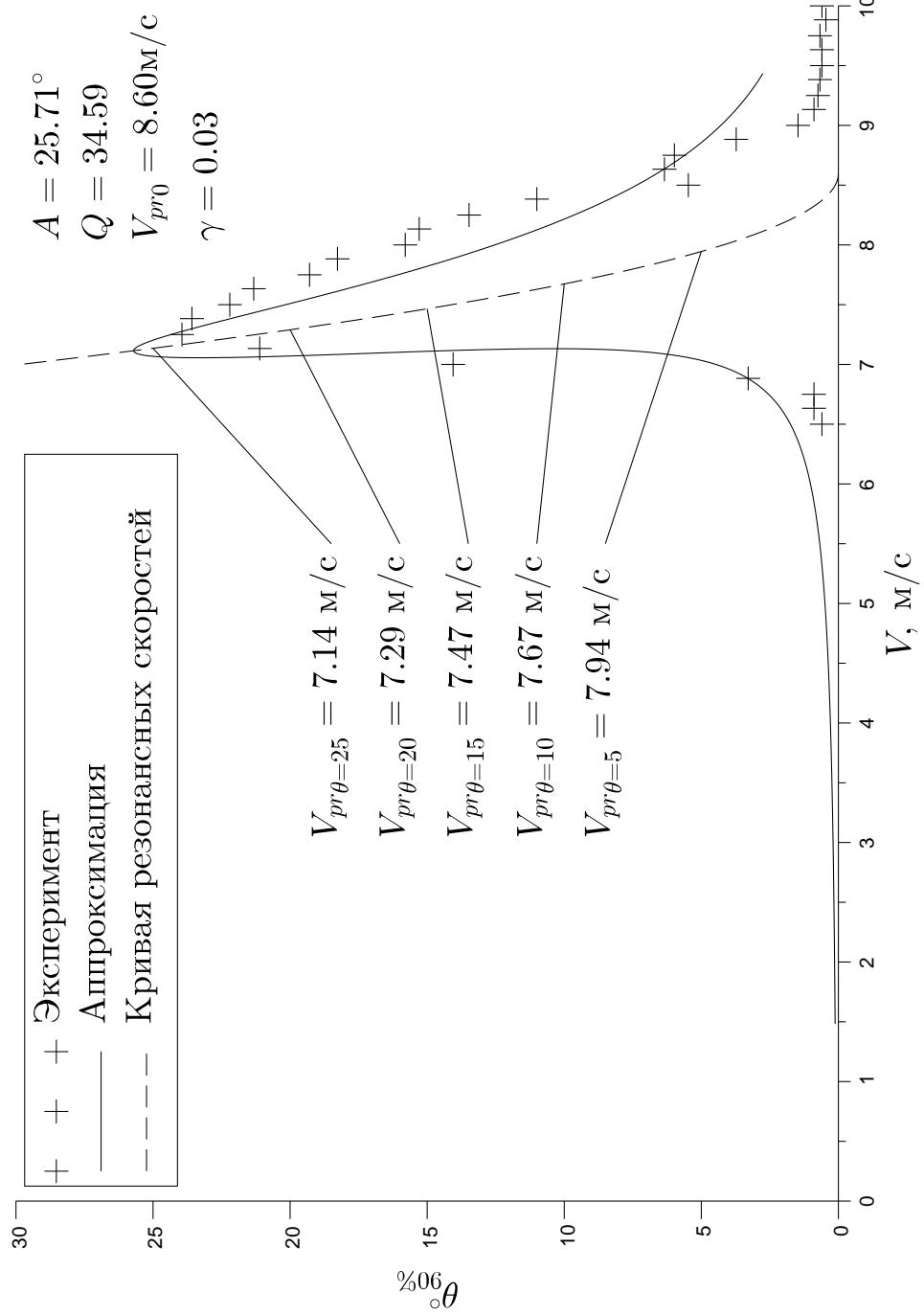


Рис. 4.9: График 10 %-ной обеспеченность модуля угла бортовой качки в зависимости от скорости судна.

Диаграмма бортовой качки для  $\theta > 30^\circ$  ( $T_{roll} = 5.52$  с,  $\omega_{roll} = 1.14$  рад/с)

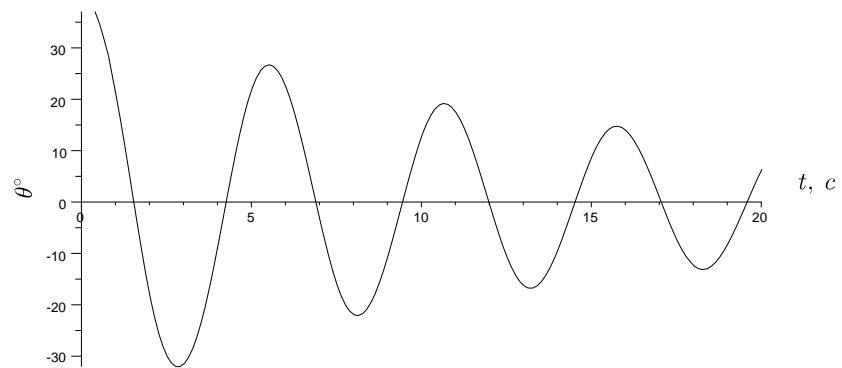


Рис. 4.10: Временная диаграмма результатов кренования для больших амплитуд угла бортовой качки.

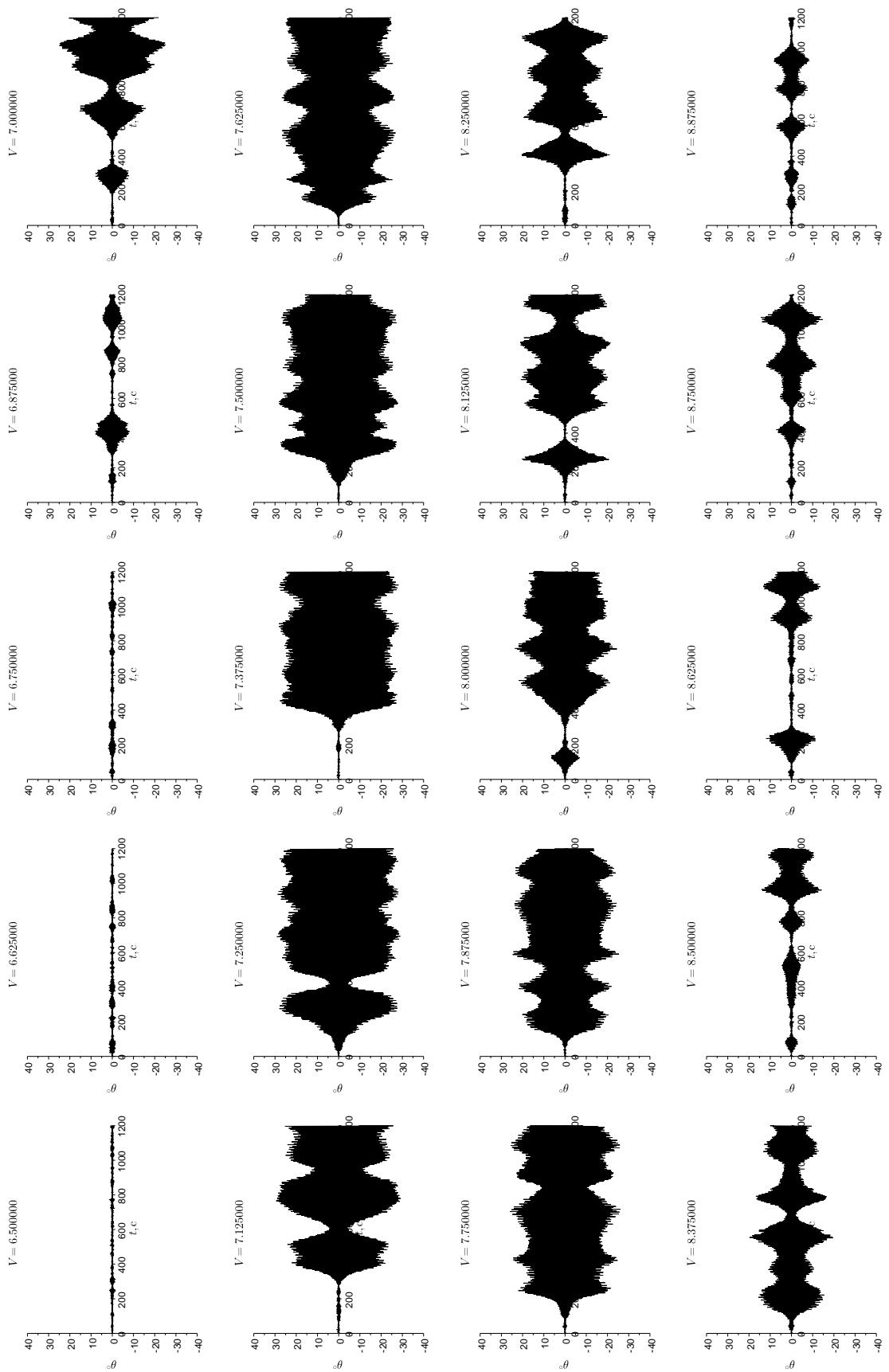


Рис. 4.11: Временные диаграммы качки для диапазона скоростей 6.5..9 м./с.

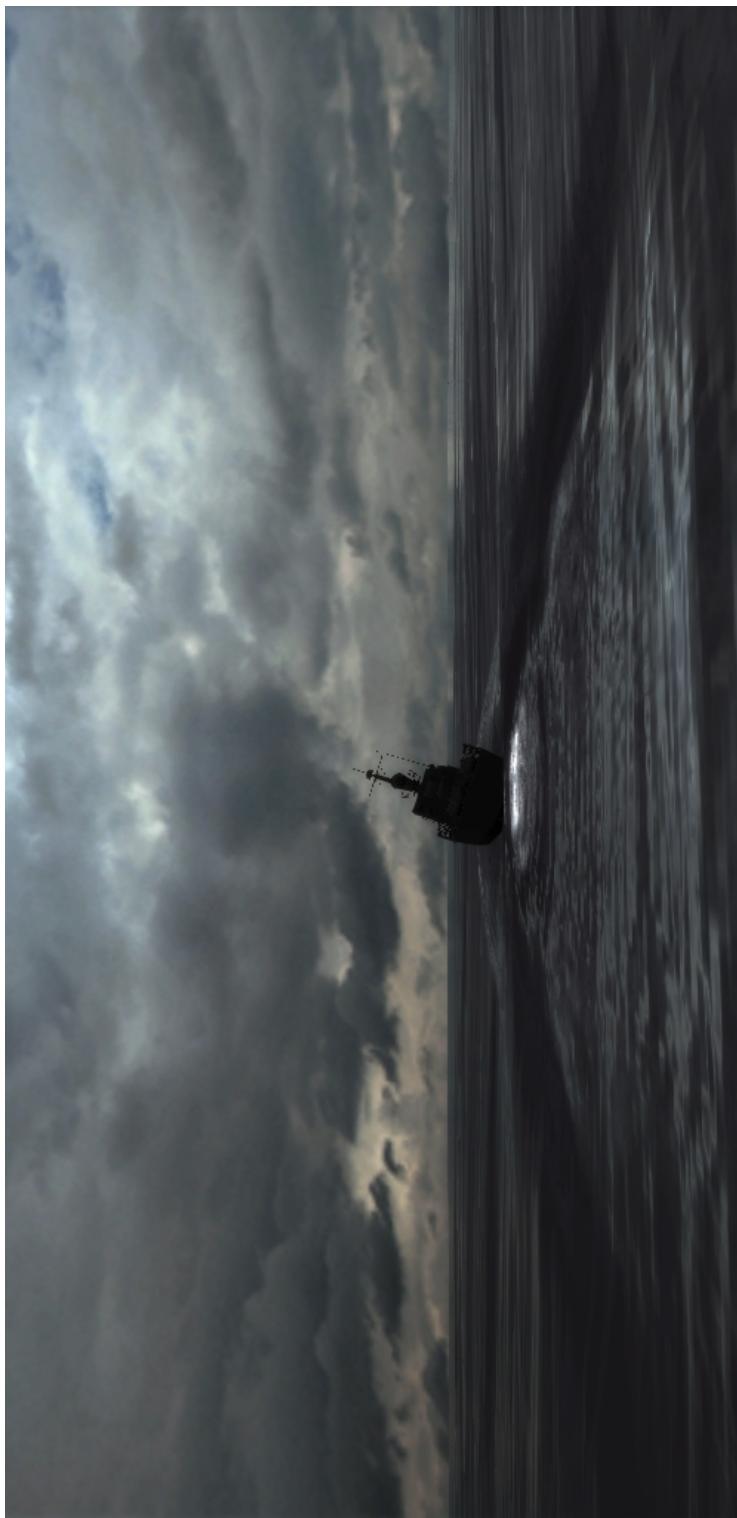


Рис. 4.12: Опасный крен вызванный параметрическим резонансом на встречной волне

## 4.4 Режим брочинга

Брочинг — явление потери управляемости при движении судна на попутных волнах, когда, подхваченное догоняющей волной, оно начинает двигаться со скоростью волны на ее переднем склоне и стремится развернуться к ней лагом. Когда брочинг заканчивается полным разворотом судна, его крен за счет удара догоняющей волны и инерционного момента может достичь опасных пределов. Наибольшую опасность брочинг представляет для малых судов.

### 4.4.1 Цель и постановка эксперимента

Условием возникновения брочинга является:

- Движение судна в направлении распространения волн:  $V = c$ .
- Длина волны (соответствующая  $\omega_{max}$ ) находится в диапазоне от длины судна до удвоенной длины судна:  $L \leq c \leq 2L$ .
- Достаточно высокая степень регулярности волнения (зыбь):  $\gamma > 10$ .

Целью эксперимента является сбор статистики возникновения явления брочинга в одинаковых условиях (различие присутствует только в стохастических параметрах, таких как фазы гармоник морского волнения).

Для проведения используются следующие параметры волнения:

- $\omega_{max} = 1.2$
- $\gamma = 20$
- $m = 64$

Для проведения эксперимента используется модель судна класса «буксир» со следующими характеристиками:

- $L = 20 \text{ m}$
- $B = 7 \text{ m}$
- $T = 2 \text{ m}$
- $D = 120\,000 \text{ kg}$

Эксперимент состоит из следующих этапов:

1. Определение буксировочной диаграммы судна — зависимости скорости судна от приложенной силы. На основе данной диаграммы выбирается постоянная буксировочная сила. Диаграмма строится следующим образом: на тихой воде к судну прикладывается фиксированная сила в течение заданного промежутка времени 30 с (за это время скорость для столь малого судна должна установиться), после чего средняя скорость за последние 10 секунд сопоставляется с выбранной буксировочной силой.
2. Проводится  $N = 200$  запусков (длительность  $60s^1$ ) в одинаковых начальных условиях (различается лишь seed в генераторе случайных чисел<sup>2</sup>).

#### 4.4.2 Анализ результатов эксперимента

Частоте волнения соответствует фазовая скорость  $c = 8.167$  м/с. Согласно эксперименту по определению буксировочной силы, для достижения скорости 8.167 м/с необходимо приложить силу равную 305 кН

В ходе эксперимента были записаны все текущие параметры судна. На основе визуального анализа траектории были выделены следующие категории явления:

1. Присутствует значительное изменение курса с последующим восстановлением направление движения. Явление может повторяться вновь.
2. Изменение курса судна, отклонение и смещение судна от заданной траектории незначительно.
3. Крайне значительное изменение курса судна. Судно остается лагом к волне.
4. Значительное изменение курса судна.
5. Судно сохраняет общее направление движения, но периодически незначительно меняет курс.

На рис. 4.14 представлены пять классов траекторий судна в режиме брочинга, а на рис. 4.15, 4.16, 4.17, 4.18, 4.19 — подробные графики различных характеристик судна для наиболее типичных для каждого класса случаев.

Результаты эксперимента сведены в таблицу. 4.1.

Таблица 4.1: Сводная таблица результатов проведения эксперимента

Класс траектории	Отклонение от курса ( $\phi_{max}$ )				
	Угол крена ( $\theta_{max}$ )	Скорость (V)	Угловая скорость ( $\theta'_{max}$ )	%	
I	70.63	25.92	7.84	0.18	23
II	68.00	25.87	7.95	0.13	10
III	101.73	42.38	7.96	0.24	22
IV	77.91	39.18	8.02	0.21	41
V	58.54	19.23	8.74	0.13	4

Потеря управляемости возникает в 90% случаев. Наиболее опасные варианты развития брочинга (максимальный крен  $\theta_{max}$  достигает 40 градусов) соответствуют классам траекторий III и IV. Суммарная вероятность наиболее опасных вариантов развития события составляет 60%.

Визуальная картина явления брочинга (несколько стадий), сформированная ВП, представлена на рис. 4.20.

## 4.5 Выводы по главе 4

В четвертой главе показано использование разработанного виртуального полигона для воспроизведения ряда экстремальных ситуаций, таких как основной и параметрический резонанс и брочинг. Выявлены качественные характеристики судна как колебательной системы в режимах основного и параметрического резонанса. Также выявлены нелинейные

---

<sup>1</sup>60 секунд — достаточное время развития явления брочинга для столкновения судна.

<sup>2</sup>Используется вихрь Мерсенна [96].

эффекты возникающие на экстремальных углах крена при параметрическом резонансе. Для режима броучинга были выделены основные классы возможных траекторий и проведена оценка вероятности потери управляемости и вероятности наиболее опасного варианта развития при котором достигаются опасные углы крена.

Диаграмма установившейся скорости

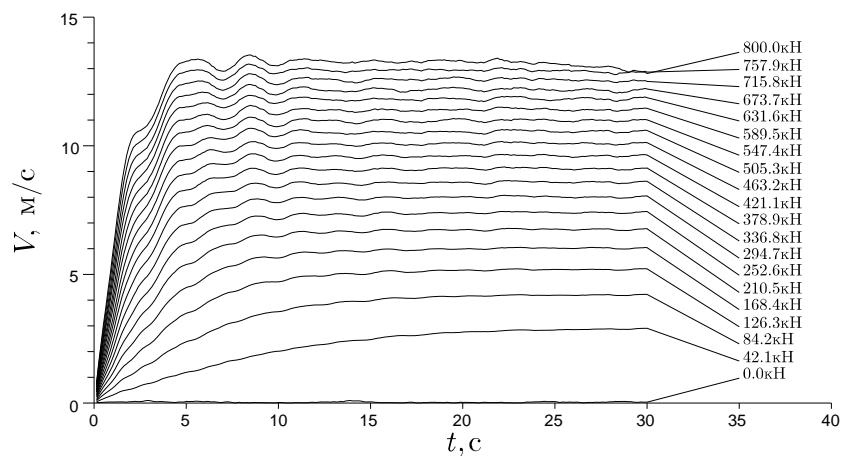


Диаграмма буксировочной силы

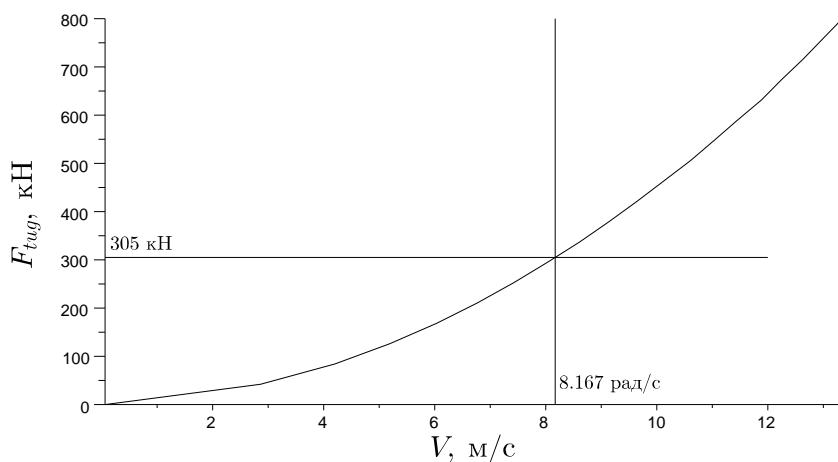


Рис. 4.13: Диаграмма установившейся скорости и буксировочной силы

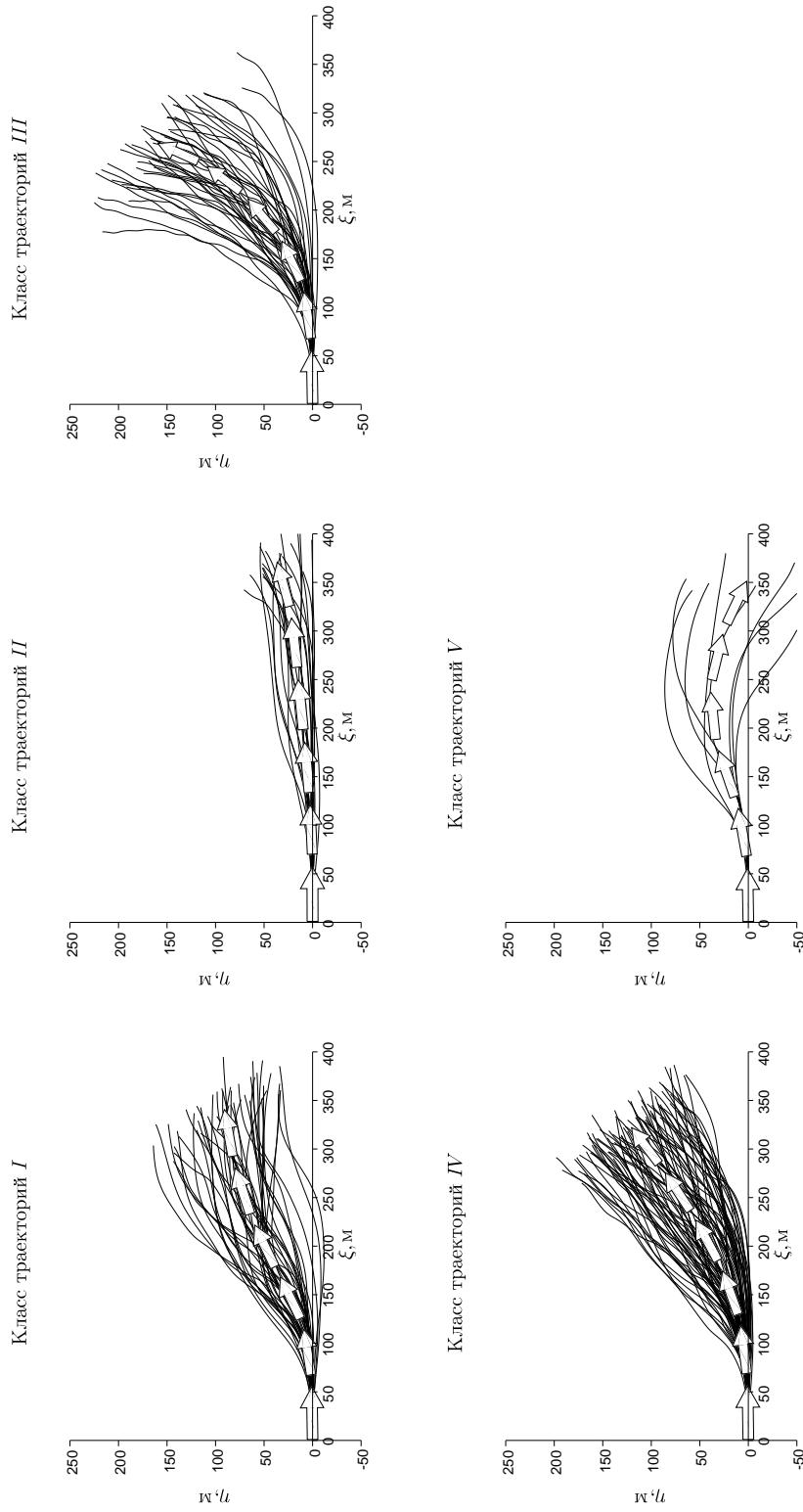


Рис. 4.14: Классы траекторий судна в режиме брочинга

## Траектория

## Крен и курс

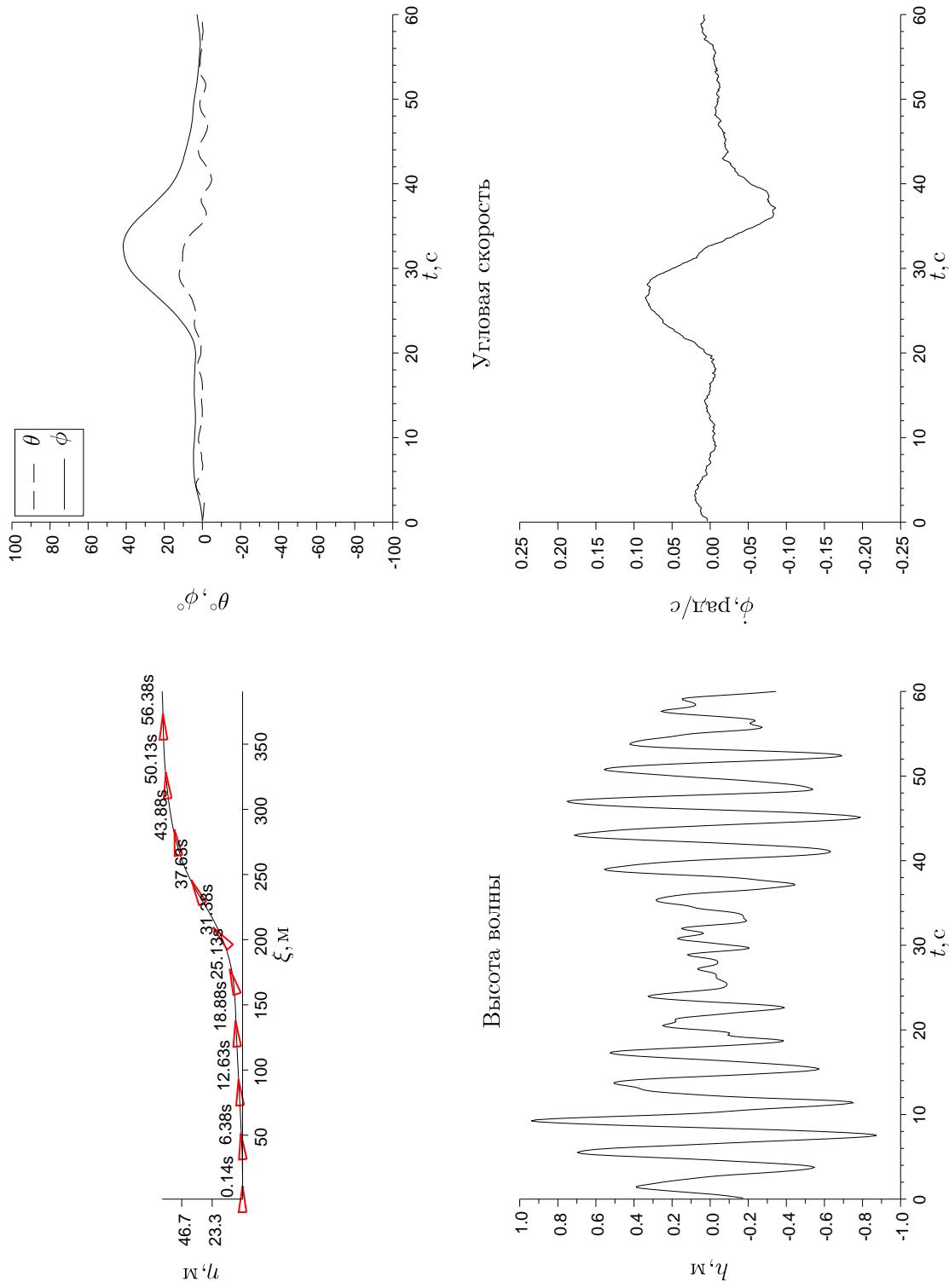


Рис. 4.15: Классы траектории I

## Траектория

## Крен и курс

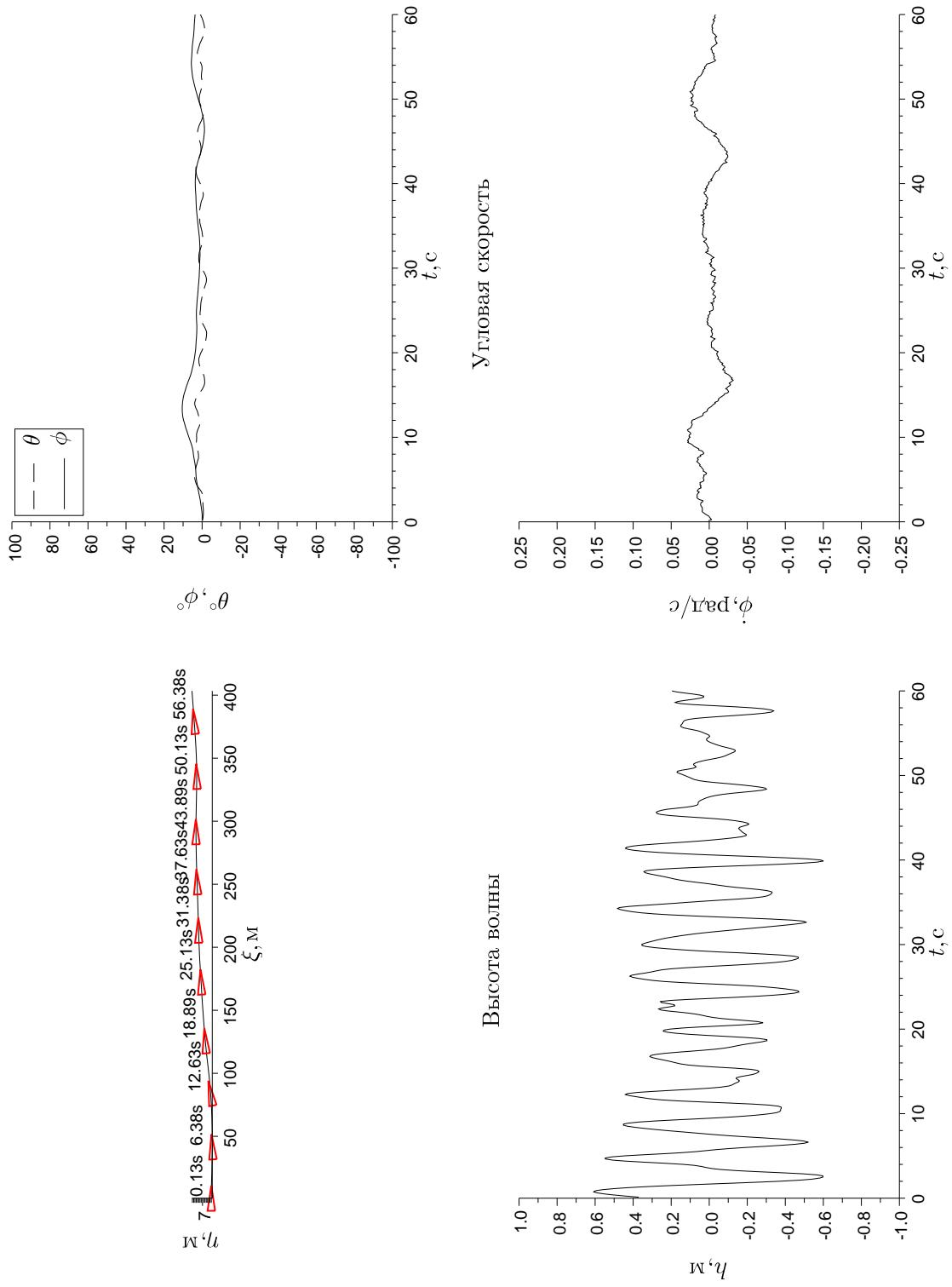


Рис. 4.16: Классы траектории II

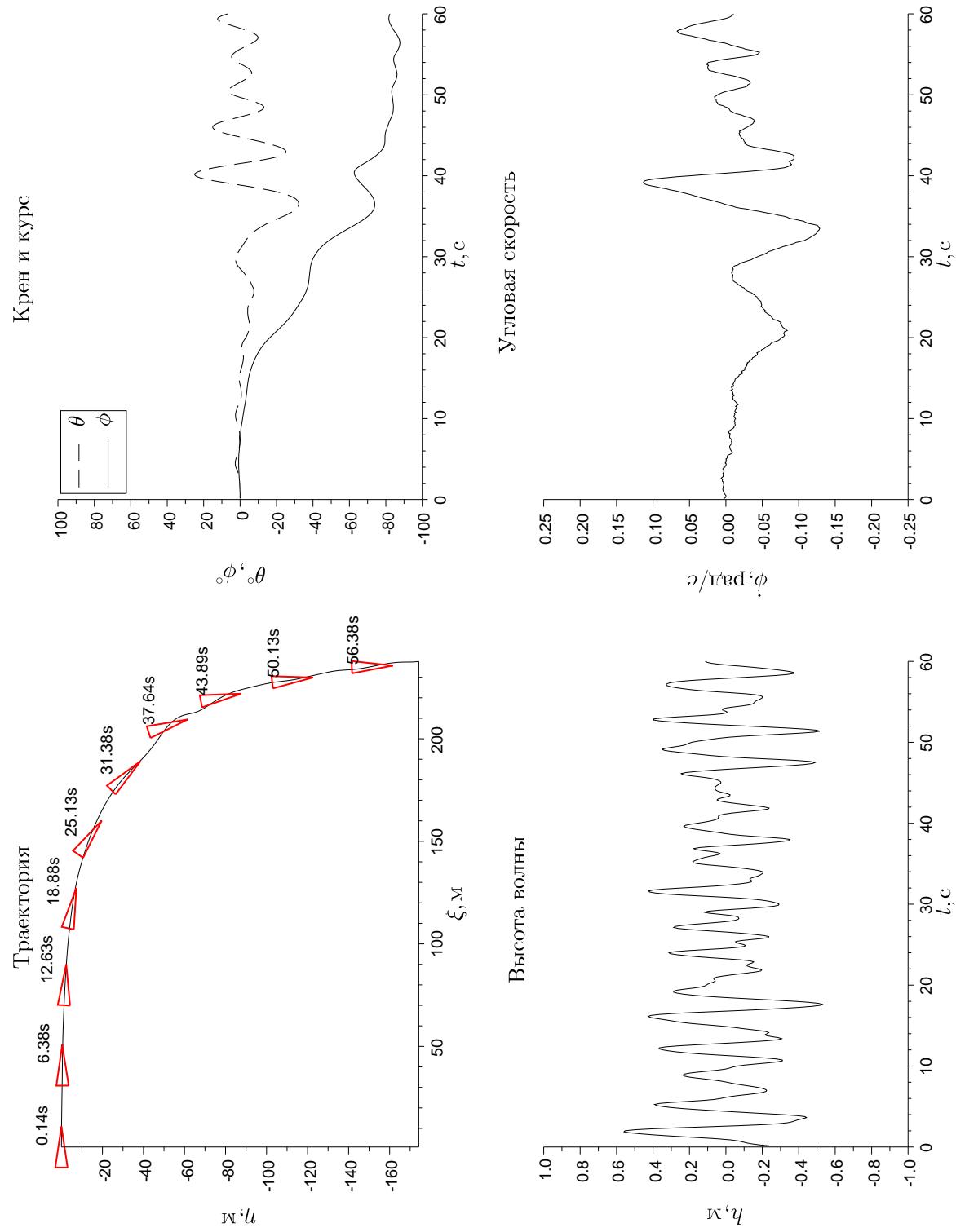
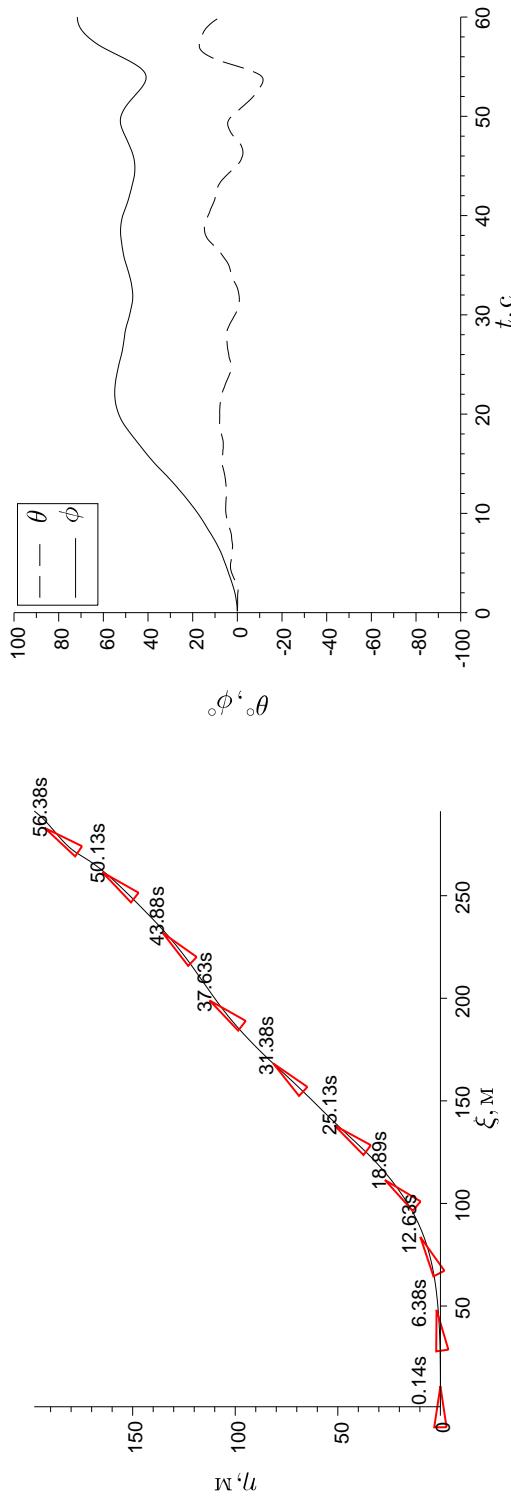


Рис. 4.17: Классы траектории III

Траектория

Крен и курс



Высота волны

Угловая скорость

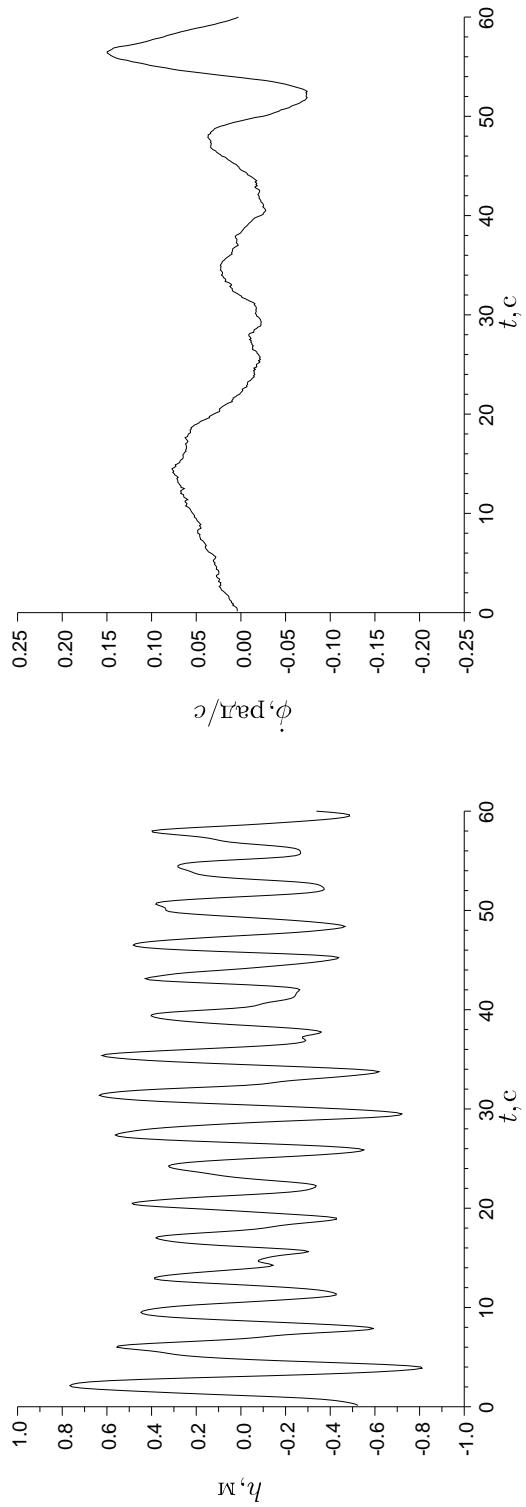


Рис. 4.18: Классы траектории IV

### Траектория

### Крен и курс

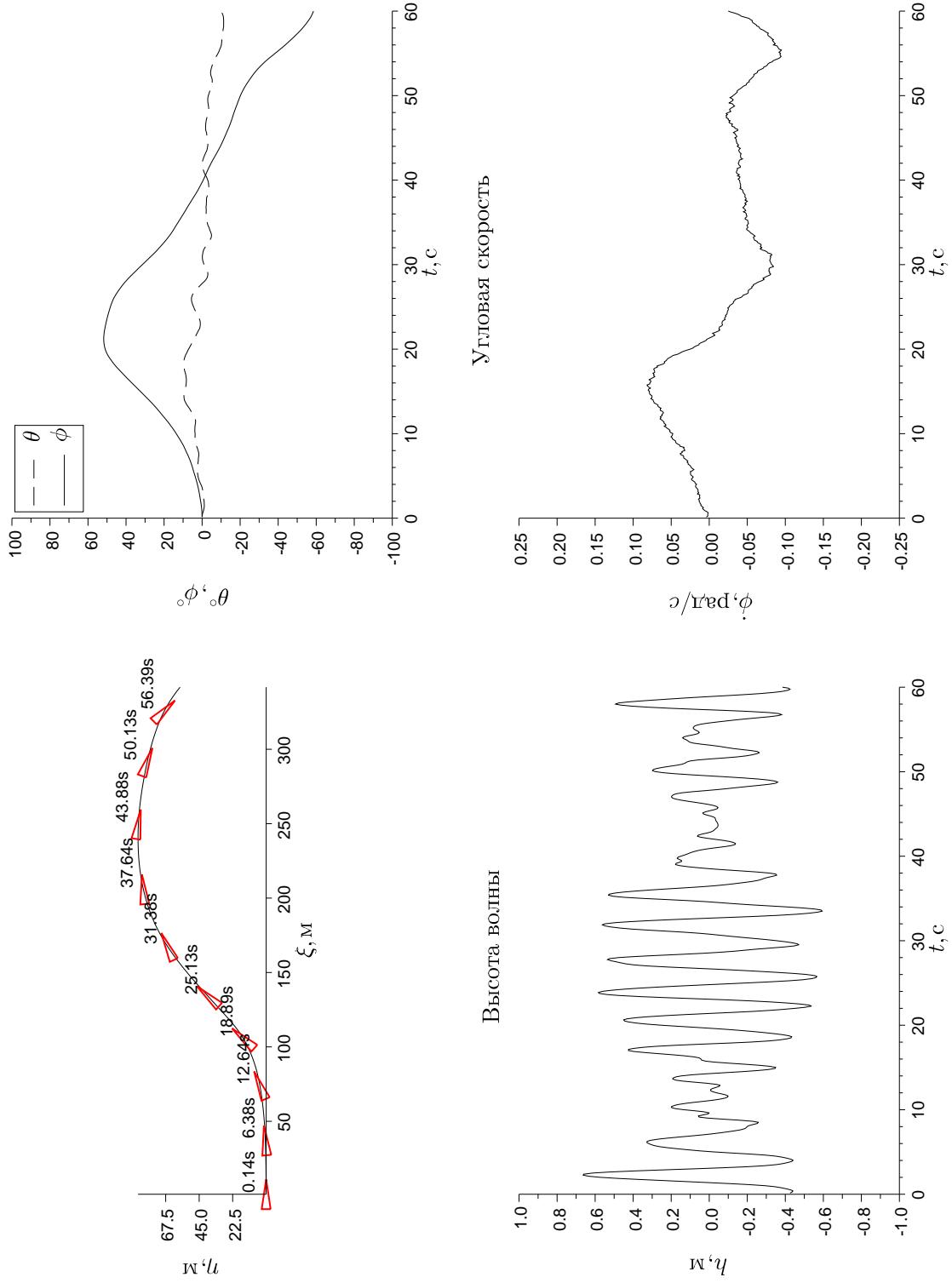


Рис. 4.19: Классы траектории V



Рис. 4.20: Стадии развития брочинга, сверху вниз: судно на вершине волны, судно начинает разворачиваться, судно получает опасный крен на борт

# Заключение

В ходе выполнения диссертационного исследования автором лично был выполнен аналитический обзор в проблемной области диссертационной работы, проведена адаптация метода моделирования динамики судна на нерегулярном волнении к задаче формирования динамических сцен в ВП, проектирование, разработка и развертывание ВП, а также проведена серия экспериментов по воспроизведению таких экстремальных явлений, как основной и параметрический резонанс и брочинг. В диссертацию включены результаты, соответствующие личному участию автора, а именно:

- развит метод численного моделирования экстремальной динамики МО с шестью степенями свободы на нерегулярном трехмерном волнении, основанный на интегрировании гидродинамических сил и моментов в нелинейной постановке на случайных сетках, допускающий интерактивное управление процессом вычислений на ВП;
- разработан метод формирования динамических сцен на основе численного моделирования динамики внешней среды и МО с учетом графических эффектов визуализации взволнованной поверхности моря и ее взаимодействия с корпусом объекта, адаптированный для применения в широкоэкраных системах ВР;
- разработана и детализирована архитектура ВП для изучения динамики МО в экстремальных условиях эксплуатации на основе модульного подхода к построению систем интерактивной визуализации;
- спроектирован и разработан программный комплекс ВП ShipX-DS, развернутый на инфраструктуре ЦСМВ СПбГУ ИТМО и продемонстрировавший свою работоспособность в ходе компьютерных экспериментов по исследованию экстремальной динамики МО в режиме основного и параметрического резонансов, а также в условиях брочинга.

# Литература

- [1] Мирзоев Д. А., Зильберштейн О. И., Лопатухин Л. И. и др. Концепция обеспечения специализированной гидрометеорологической информацией проектирования сооружений на шельфе арктических морей // Труды четвертой Междунар. конференции «Освоение шельфа арктических морей». РАО-99. СПб., 1999.
- [2] Апполонов Е.М., Бойцов Г.В., Кудрин М.А., Кутейников М.А., Шишенин Е.А. Исследования взаимодействия корпуса с аномальной волной на примере гибели судна “Аурелия”, Российский морской регистр судоходства, Научно-технический сборник, выпуск 29, стр. 28-44.
- [3] Александров В.Л., Матлах А.П., Начаев Ю.И., Поляков В.И., Ростовцев Д.М., Интеллектуальные системы в морских исследованиях и технологиях / Под ред. Ю.И. Нечаева. СПбЖ Изд. центр СПбГМТУ, 2001, 395 с.
- [4] Нечаев Ю.И., Дегтярев А.Б., Бухановский А.В. Определение областей безопасной качки при оценке динамики судна на волнении. Доклады НТК «Проблемы мореходных качеств судов и корабельной гидромеханики» (XL Крыловские чтения), СПб, 2001, с. 117-119.
- [5] Справочные данные по режиму ветра и волнения Японского и Карского морей / Лопатухин Л.И., Бухановский А.В., Чернышева Е.С. // Российский Морской регистр судоходства, СПб, 2009, 358 с.
- [6] Зильман Г.И., Китаева Е.Т., Мирохин Б.В. Исследование особенностей качки судна на нерегулярном волнении методом статистического моделирования. - Научно-тех. сб. Регистра СССР, 1986, вып.15, с.3-9.
- [7] Дегтярев А. Б. Методология анализа и прогноза мореходных качеств судов на основе высокопроизводительных компьютерных технологий

гий // диссертация доктора технических наук : 05.08.01, 05.13.18 / С.-Петербург. гос. мор. техн. ун-т. Санкт-Петербург, 2004.- 450 с.

- [8] Бухановский А.В., Дегтярев А.Б., Лопатухин Л.И., Рожков В.А. Вероятностное моделирование морского волнового климата // Известия АН. Физика атмосферы и океана, 1998, т.34, №2, с.261-266.
- [9] Нечаев Ю.И., Завьялова О.П. Экстремальная ситуация «брочинг»: анализ и критериальные оценки условий «захвата» и опрокидывания судна // Морской вестник. №1(9). 2004, с.87-92.ы.
- [10] Атавин А.А., Васильев О.Ф., Таракевич В.В., Яненко А.П. Нестационарные процессы в судопропускных сооружениях: математическое и лабораторное моделирование, натурные испытания. Proceedings of International Conference RDAMM-2001, с. 63-69.
- [11] Бухановский А.В., Лопатухин Л.И., Иванов С.В. Подходы, опыт и некоторые результаты исследований волнового климата океанов и морей. I. Постановка задачи и входные данные. Вестник СПбГУ, сер. 7, вып. 3, 2005, с. 62-74.
- [12] Александреску А. Современное проектирование на C++: Обобщенное программирование и прикладные шаблоны проектирования = Modern C++ Design: Generic Programming and Design Patterns Applied. — С. П.: Вильямс, 2008. — 336 с. — (C++ in Depth) .
- [13] Лонге–Хиггинс М.С. Статистический анализ случайной движущейся поверхности. В кн.: Ветровые волны. М., ИЛ, 1962, с. 112–230.
- [14] Бородай И.К., Нецеваев Ю.А. Качка судов на морском волнении // Л., Судостроение, 1969.
- [15] Зенкин А.А. Когнитивная компьютерная графика / ред. Поспелов Д.А.. — М: Наука, 1991. —192 С.
- [16] И.Г. Ханович, Качка корабля, Военное Изд. Министерства Вооруженных Сил Союза ССР, М., 1947. .
- [17] Проблемы исследования и математического моделирования ветрового волнения // под ред.И.Н.Давидана. СПб., Гидрометеоиздат, 1995.
- [18] Пирсон В.Дж. Ветровые волны.-в сб.: Ветровые волны., М., ИЛ, 1962, с. 42-124.

- [19] Луговский В.В. Нелинейные задачи мореходности корабля. Л., Судостроение, 1966.
- [20] Некрасов В.А. Вероятностные задачи мореходности судов. Л., Судостроение, 1978.
- [21] Безгодов А.А., Стародубцев Э.В. Реализация модели освещения Кука-Торренса с использованием технологии Deferred Shading // // Научно-технический вестник СПб ГУ ИТМО. 2008. с. 34-44.
- [22] Лопатухин Л.И. Ветровое волнение. Санкт-Петербург, 2004. .
- [23] ОСТ 5.1003-80. Методика расчета качки водоизмещающих кораблей и судов. Л., 1980.
- [24] A note on ethical aspects of BCI / P. Haselagera, R. Vleka, J. Hillb, F. Nijboer // Neural Networks, Volume 22, Issue 9, November 2009. - pp. 1352-1357.
- [25] Arabshahi, A., Taylor, L. K., and Whitfield, D. L., UNCLE: Toward A Comprehensive Time-Accurate Incompressible Navier-Stokes Flow Solver, "AIAA-95-0050, AIAA 33rd Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV, January 1995.
- [26] Belenky V., Boukhanovsky A., Degtyarev A. On Probabilistic Qualities of Severe Rolling. Proceedings of the International Symposium “Ship Safety in a Seaway: Stability, Manoeuvrability, Nonlinear Approach”. Kaliningrad 15-19 May 1995, Vol.1, Paper 7, 19 p.
- [27] Belenky V.L. Probabilistic qualities of nonlinear stochastic rolling / V.L. Belenky, A.B. Degtyarev, A.V Boukhanovsky // Ocean Engineering. – 1998. - Vol. 25, №1. - P. 1–25.
- [28] Belenky, V.L., Weems, K.M., W.M. Lin, Paulling J.R. Probabilistic analysis of roll parametric resonance in head seas, Proc. of STAB'03 8th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, Madrid, Spain.
- [29] Benedict D. Rogers. (2004) SPH Modeling of Breaking Waves, Coastal Engineering, pp 415-427.
- [30] Boukhanovsky A.V., Guedes Soares C. Modelling of multipeaked directional wave spectra // Applied Ocean Research, 31 – 2009, p. 132-141.

- [31] Brooks Jr. F.P. What's Real About Virtual Reality? // IEEE Computer Graphics And Applications, 19(6). – 1999. – pp. 16-27.
- [32] Burdea G.C., Coiffet P. Virtual Reality Technology, 2nd Edition. - Wiley-IEEE Press, 2003. - 464 p.
- [33] Charles W. Brice, Levent U. Gökdere, Roger A. (1998) DougalThe Virtual Test Bed: An Environment for Virtual Prototyping. Proceedings of International Conference on Electric Ship (ElecShip'98), pp. 27-31, Istanbul, Turkey, September .
- [34] Cho S. Hong S., Kim J. Park I. The Numerical Study on the Coupled Dynamics of Ship Motion and Flooding Water // Proceedings of 9th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles (STAB-2006) – 25-29 September, Rio de Janeiro, Brazil, 2006 (CD-version).
- [35] Claes Johanson «Real-time water rendering: Introducing the projected grid concept» Master of Science thesis .
- [36] Clausen J. Man, machine and in between // Nature, 457 (26 February 2009). - 2009. - pp. 1080-1081.
- [37] Computational Steering / R. van Liere, J.D. Mulder, J.J. Van Wijk // Future Generation Computer Systems, Elsevier North-Holland, vol. 12, 441-450, 1997.
- [38] Cook, R.L., Torrance. K.E., 1982. A Reflectanhce Model for Computer Graphics .
- [39] Cruz-Neira C., Sandin D.J., DeFanti T.A. Surround-Screen Projection-based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE // SIGGRAPH'93: Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1993.
- [40] Degtyarev A.B., Boukhanovsky A.V. Peculiarities of motion of ship with low buoyancy on asymmetrical random waves. Proceedings of the 7th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, STAB'2000, 7–11 Feb., Launceston, Tasmania, Australia, 2000, pp.865–679.
- [41] E. Catmull and J. Clark: Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes, Computer-Aided Design 10(6):350-355 (November 1978) .

- [42] Flexible soft real-time processing in middleware / S.A. Brandt, G.J. Nutt // Real-Time Systems, Volume 22, Numbers 1-2. - 2002. - pp. 77-118.
- [43] Flow Vision // Режим доступа: <http://www.flowvision.ru/> [свободный].
- [44] fmod - interactive audio middleware [<http://www.fmod.org/>] .
- [45] fMRI Brain-Computer Interface: A Tool for Neuroscientific Research and Treatment / R. Sitaram [et al.] // Computational Intelligence and Neuroscience. Volume 2007 (2007), Article ID 25487, doi:10.1155/2007/25487. - 10 p.
- [46] Fonseca N.; Guedes Soares C.; Pascoal R. Global Loads on a FPSO Induced by a Set of Freak Waves // J. Offshore Mech. Arct. Eng. 131, 011103, 2009 (электронный доступ на [http://asmedl.aip.org/journals/doc/ASMEDL-home/most\\_downloaded.jsp?KEY=JMOEEX&Year=2008&Month=12&agg=md](http://asmedl.aip.org/journals/doc/ASMEDL-home/most_downloaded.jsp?KEY=JMOEEX&Year=2008&Month=12&agg=md)).
- [47] France W.N.; Levadou M.; Treakle T.W.; Paulling J.R.; Michel R.K.; Moore C. An Investigation of Head-Sea Parametric Rolling and Its Influence on Container Lashing Systems, Marine Technology, Volume 40, Number 1, 1 January 2003 , pp. 1-19(19) .
- [48] Game Physics Simulation [<http://bulletphysics.org/wordpress/>] .
- [49] Hammock A. The future of brain-controlled devices. CNN. 2010 [<http://edition.cnn.com/2009/TECH/12/30/brain.controlled.computers/index.html>].
- [50] Herault, A. Bilotta, G., Del Negro, C. Russo, G. Vicari, A. (2009) SPH Modeling of Lava Flows With GPU Implementation, Proceedings of 4th International Scientific Conference on Physics and Control, Catania, Italy, September, 1–September, 4 2009.
- [51] IIHR - Hydroscience & Engineering Ship Hydrodynamics Website, Режим доступа: <http://www.iihr.uiowa.edu/shiphydro/cfdshipiowa.htm> [свободный].
- [52] J. Monaghan and R. Gingold. (1983) Shock simulations by the particle method sph. Journal of Comp. Physics, Vol. 52, p.374.
- [53] Jorge Bardina and T. Rajkumar. Dougal. Intelligent Launch and Range Operations Virtual Test Bed (ILRO-VTB). Proceedings Vol. 5091 Enabling Technologies for Simulation Science VII, Alex F. Sisti; Dawn A. Trevisani, Editors, pp.141-148 .

- [54] Ki-Han Kim, Joseph Gorski, Ronald Miller, Robert Wilson, Frederick Stern, Mark Hyman, Clarence Burg, Simulation of Surface Ship Dynamics, dod\_ugc, pp.188, 2003 User Group Conference (DoD UGC'03), 2003.
- [55] Lin W.M., Yue D.K.P. "Time-Domain Analysis for Floating Bodies in Mild-Slope Waves of Large Amplitude", Proceedings of the Eight International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, Newfoundland, Canada.
- [56] Lopatoukhin L.J. Freak waves generation and their probability (Бероятность возникновения волн-убийц) / L.J. Lopatoukhin, A.V. Boukhanovsky // Int. Shipbuilding Progress. – 2004. - Vol. 51, №2-3. - P. 157-171.
- [57] Martin Mittring «Finding Next Gen – CryEngine 2» Advanced Real-Time Rendering in 3D Graphics and Games Course – SIGGRAPH 2007 .
- [58] Michal Chladek, Roman Durikovic, (2010) Smoothed Particle Hydrodynamics in Flood Simulations, Proceedings of the 26th Spring Conference on Computer Graphics.
- [59] Michiel van der Leeuw., 2007. “Deferred Rendering in Killzone 2”. Presentation. .
- [60] Monaghan, J. J. (1992) Smoothed particle hydrodynamics, Annual review of astronomy and astrophysics. Vol. 30 (A93-25826 09-90), p. 543-574.
- [61] Motion Simulation Capabilities of Three-Degree-of-Freedom Flight Simulators / N.A. Pouliot, C.M. Gosselin, M.A. Nahon // Journal of Aircraft 35 (1). - 1998. - pp. 9–17.
- [62] Ngan, A., Durand, F., Matusik, W., 2004. Experimental Analysis of BRDF Models. .
- [63] Pawłowski M. Effect of Decks on Survivability of Ro-Ro Vessels // Proceedings of 9th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles (STAB-2006) – 25-29 September, Rio de Janeiro, Brazil, 2006 (CD-version).
- [64] Prospects for Computational Steering of Evolutionary Computation / S. Bullock, J. Cartlidge, M. Thompson // Workshop Proceedings of the

Eighth International Conference on Artificial Life. MIT Press. - 2002. - pp. 8–13.

- [65] R. Ierusalimschy, L. H. de Figueiredo, W. Celes, The implementation of Lua 5.0, Journal of Universal Computer Science 11 #7 (2005) 1159–1176.
- [66] Reshetov A. 2009. Morphological Antialiasing. In Proceedings of High Performace Graphics. <http://visual-computing.intel-research.net/publications/papers/2009/mlaa/mlaa.pdf> .
- [67] Rognebakke, O. F. & Faltinsen, O. M., 2001, ‘Effect of sloshing on ship motions,’ 16th IWWFB, Hiroshima (электронный доступ [http://www.iwwfb.org/Abstracts/iwwfb16/iwwfb16\\_35.pdf](http://www.iwwfb.org/Abstracts/iwwfb16/iwwfb16_35.pdf) ).
- [68] Rognebakke, O. F. & Faltinsen, O. M., 2003, ‘Coupling of sloshing and ship motions,’ J. Ship Research, 47, 3, 208-221.
- [69] ROGUE WAVES 2008 // Proceedings of International Conference // Brest, France, 13-15 October 2008, edited by M. Olagnon & M. Prevosto. Режим доступа: <http://www.ifremer.fr/web-com/stw2008/rw/papers.html> [свободный].
- [70] Semantic eScience: Encoding Meaning in Next-Generation Digitally Enhanced Science / P. Fox, J. Hendler // The Fourth Paradigm. Data-Intensive Scientific Discovery. – Misrosoft, 2009. – pp. 147-152.
- [71] Shin Y.S., Belenk V.L., Lin W.M., Weems K.M., Engle A.H. Nonlinear time domain simulation Technology for Seakeeping and Wave Load Analysis for Model Ship Design, SNAME Annual Meeting, San-Francisco, U.S.A., 2003.
- [72] Shishkovtsov, O. 2005. Deferred shading in S.T.A.L.K.E.R. GPU gems 2 : programming techniques for high-performance graphics and general-purpose computation / edited by Matt Pharr ; Randima Fernando, series editor.
- [73] Shyh-Leh Chen, Wei-Chih Hsu FUZZY SLIDING MODE CONTROL FOR SHIP ROLL STABILIZATION. Asian Journal of Control, Vol. 5, No. 2, pp. 187-194.
- [74] Spyrou K.J., “The Nonlinear Dynamics of Ships in Broaching”, Marie Curie Fellowships Annals, Vol. 1. (электронный доступ <http://www.mariecurie.org/annals/volume1/spyrou.pdf> ).

- [75] Stochastic simulation of inhomogeneous metocean fields. Part I: Annual variability / A.V. Boukhanovsky [et al] // Lecture Notes in Computer Science. – 2003. – Vol. 2658. - P. 213-222.
- [76] Stochastic simulation of inhomogeneous metocean fields. Part II: Synoptic variability and rare events / A.V. Boukhanovsky [et al] // Lecture Notes in Computer Science. – 2003. – Vol. 2658. – P. 223-233.
- [77] Sturman, D.J., Zeltzer, D. A survey of glove-based input // IEEE Computer Graphics and Applications 14 (1). - 1994. - pp. 30–39.
- [78] Surendran S. Kiran V. Control of ship roll motion by active fins using fuzzy logic. Ships and Offshore Structures, Volume 2, Issue 1 2007 , pp. 11 – 20.
- [79] Tamburrini G. Brain to Computer Communication: Ethical Perspectives on Interaction Models // NEUROETHICS, Volume 2, Number 3. - 2009. - pp. 137-149.
- [80] The FreeImage Project [<http://freeimage.sourceforge.net/>] .
- [81] The Virtual Tank Utility in Europe (FP 6 – 516201) // Режим доступа: [http://www.hsva.de/01\\_profile\\_content/press\\_content/VIRTUE\\_for\\_Naval\\_Architect.pdf](http://www.hsva.de/01_profile_content/press_content/VIRTUE_for_Naval_Architect.pdf) [свободный].
- [82] TouchTable [<http://www.touchtable.com/>].
- [83] Umeda N., Hashimoto H., Vassalos D., Urano S. Okou K. Nonlinear Dynamics ion Parametric Roll Resonance with Realistic Numerical Modelling. Proc. of 8th Inter. Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles STAB03.
- [84] Visual Mining of Cluster Hierarchies / H.-P. Kriegel, S. Brecheisen, E. Januzaj, P. Kroger, M. Pfeifle // Proc. 3rd Int. Workshop on Visual Data Mining (VDM@ICDM2003). - 2003. - pp. 151-165.
- [85] Visualization for Data-Intensive Science / C. Hansen, C.R. Johnson, V. Pascucci, C.T. Silva // The Fourth Paradigm. Data-Intensive Scientific Discovery. – Microsoft, 2009. – pp. 153-163.
- [86] Visually mining and monitoring massive time series / J. Lin, E. Keogh, S. Lonardi, J.P. Lankford, D.M. Nystrom // Proceedings of the 10 th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. - 2004. - pp. 460-469.

- [87] Welcome to Microsoft Surface [<http://www.microsoft.com/surface/>].
- [88] Weymouth G.D., Wilson R.V., Stern F. RANS Computational Fluid Dynamics Predictions of Pitch and Heave Ship Motions in Head Seas, Journal of Ship Research, Vol. 49, No. 2, June 2005, pp. 80–97.
- [89] W.G. Hoover (2006) Smooth Particle Applied Mechanics: The State of the Art. World / Scientific Publishing Co Pte Ltd.
- [90] Wu, G.X. and Hu, Z.Z. (2004) Simulation of nonlinear interactions between waves and floating bodies through a finite-element-based numerical tank. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences, 460 (2050). pp. 2797-2817.
- [91] Xsens Human Mocap, доступ свободный [<http://www.xsens.com/en/company-pages/company/human-mocap/>].
- [92] Yarwood B. Virtual Space - The Future Of Movies and Video Games // 2009, доступ свободный [<http://www.virtualspace.org.uk/>].
- [93] Bitmap Font Generator. [<http://www.angelcode.com/products/bmfont/>].
- [94] Boukhanovsky A.V., Lopatoukhin L.J. Ryabinin V.E. Evaluation of the highest wave in a storm. Marine meteorology and related Oceanographic Activities. Report #38, WMO-TD-№858, 1998, 21 p.
- [95] Harald E. Krogstad. (1989) Simulation of Multivariate Gaussian Time Series. Communication in Statistics. 18(3), p. 929–941.
- [96] Mersenne Twister Home Page [<http://www.math.sci.hiroshima-u.ac.jp/~m-mat/MT/emt.html>].
- [97] Scilab WebSite [<http://www.scilab.org/>].
- [98] Sloot P.M.A., Frenkel D., Van der Vorst H.A. et al. Computational e-Science: Studying complex systems in silico. A National Coordinated Initiative. White Paper, February 2007. (<http://www.science.uva.nl/research/scs/papers/archive/Sloot2007a.pdf>)  
.
- [99] The Programming Language Lua [<http://www.lua.org/>].