

Безгодов Алексей Алексеевич

**ВИРТУАЛЬНЫЙ ПОЛИГОН
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ
В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Специальность 05.13.18 — Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург — 2011

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете информационных технологий, механики и оптики
на кафедре информационных систем

Научный руководитель: доктор технических наук
Бухановский А.В.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Якобовский М.В.

доктор технических наук,
профессор Палташев Т.Т.

Ведущая организация: Московский физико-технический институт
(государственный университет)

Защита состоится 6 июля 2011 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.227.06 в СПбГУ ИТМО по адресу:
197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики.

Автореферат разослан 6 июня 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

Лисицына Л.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. 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 (VR), 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 промышленности¹. Процесс проектирования и разработки ВП требует совокупного учета особенностей методов компьютерного моделирования в конкретной предметной области и соответствующих возможностей технологий VR, 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. Якобовского, Ю.М. Баяковского, М.В. Михайлюка, 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 опытовых бассейнах, и требует развития соответствующих проблемно-ориентированных программных комплексов на основе технологии ВП, что и определяет актуальность темы диссертации.

¹ Sloot P.M.A., Frenkel D., Van der Vorst H.A. et al. Computational e-Science: Studying complex systems in silico. A National Co-ordinated Initiative. White Paper, February 2007. (<http://www.science.uva.nl/research/scs/papers/archive/Sloot2007a.pdf>)

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 на основе численного моделирования динамики внешней среды и МО, и его адаптация для широкоэкранных систем ВР.
- Проектирование, разработка и отладка программного комплекса ВП, его развертывание на аппаратной инфраструктуре Центра ситуационного моделирования и визуализации (ЦСМВ)².
- Апробация ВП для проведения компьютерных экспериментов по исследованию экстремальной динамики МО в режиме основного и параметрического резонансов, а также в условиях броуновского движения.³

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.

² ЦСМВ – центр коллективного пользования СПбГУ ИТМО

³ Неуправляемый разворот судна вследствие «захвата» волной, сопровождаемый сильным динамическим креном

Практическую ценность работы составляют:

- Комплект программной и эксплуатационной документации на программную систему для моделирования и визуализации динамики МО в экстремальных условиях эксплуатации⁴.
- 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 широкоэкранных систем ВР.

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

⁴ Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2011611381 – 2011

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 практике 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).

Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве, заключался в выполнении аналитического обзора в проблемной области диссертационной работы, адаптации метода моделирования динамики судна на нерегулярном волнении к задаче формирования динамических сцен, проектировании, разработке и развертывании виртуального полигона, а также проведении серии экспериментов по воспроизведению таких экстремальных явлений, как основной и параметрический резонанс и броуновский броуинг. В диссертацию включены результаты, соответствующие личному участию автора.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы (99 наименований). Содержит 126 с. текста, включая 45 рис. и 1 табл.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность проблемы, формулируются цель и задачи исследования, отмечаются научная новизна и практическая значимость результатов, перечисляются основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен аналитический обзор моделей динамики внешней среды и ее воздействия на МО применительно к задачам ВП. Для описания стохастической изменчивости внешней среды (ветра и волнения) рассматривается обобщенный подход на основе композиции набора разномасштабных моделей в мелкомасштабном, синоптическом, сезонном и межгодовом диапазонах изменчивости. Для общего описания ветро-волнового климата используется понятие климатического спектра, соответствующего определенному синоптическому состоянию с заданной режимной обеспеченностью. Климатический спектр позволяет идентифицировать параметры модели мелкомасштабной изменчивости поля морского волнения в двух альтернативных постановках: на основе уравнений авторегрессии-скользящего среднего и в форме разложений со случайными параметрами. В свою очередь, модели расчета динамики МО под воздействием внешних возмущений можно условно разделить на четыре класса по способу

использования информации о внешних воздействиях: спектральные модели (в частотной области), асимптотические стохастические модели (во временной области), нелинейные модели на основе интегрирования уравнений движения, имитационные модели динамики судна, основанные на прямом решении задач гидромеханики с вычислением характеристик сплошной среды со взволнованной поверхностью.

Для использования в составе ВП необходим согласованный выбор методов моделирования динамики МО и внешней среды. Основной задачей ВП является создание высокореалистичных динамических сцен, что обеспечивает естественное восприятие пользователем моделируемых процессов в режиме *реального времени*. При этом должна обеспечиваться возможность гибкой настройки параметров моделей и сценариев численных экспериментов путем интерактивного управления динамической сценой в процессе моделирования. Как следствие, это существенно ограничивает применение традиционных видов моделей динамики МО. Нелинейные модели, основанные на дифференциальных уравнениях классической механики относительно главных сил и моментов, в основном адаптированы под отдельные классы экстремальных задач за счет введения соответствующих нелинейных членов; они не обеспечивают необходимую гибкость управления при проведении эксперимента. Напротив, полные гидродинамические модели⁵, основанные на численном решении уравнений Навье-Стокса, лишены этого недостатка; однако их реализация существенно более ресурсоемка. Как следствие, для использования в составе ВП в диссертационной работе рассмотрен класс комбинированных моделей, основанных на уравнениях классической механики, основные силы и моменты в которых определяются путем интегрирования гидростатического и гидродинамического давления по корпусу МО в каждый момент времени. Как следствие, это определяет выбор класса методов моделирования динамики внешней среды в сторону разложений со случайными параметрами (модель Лонге-Хиггинса). Это связано с тем, что конкурирующий с ним класс авторегрессионных моделей не позволяет напрямую рассчитывать поле гидростатического и гидродинамического давления под взволнованной поверхностью моря; также он не эффективен для использования на нерегулярных сетках. Таким образом, проведенный анализ позволил обосновать основные методические решения, применяемые в ВП, ориентированных на исследование поведения МО в экстремальных условиях эксплуатации.

Вторая глава посвящена развитию метода численного моделирования динамики МО с шестью степенями свободы на трехмерном нерегулярном волнении применительно к задачам ВП. Это обусловлено тем, что интерактивная высокореалистичная визуализация требует применения адаптированных моделей и методов, ориентированных на воспроизведение основных качественных эффектов с разумным уровнем точности для широкого диапазона условий эксперимента, с временными затратами, обеспечивающими использование в режиме реального времени. Поскольку структура традиционных моделей динамики МО в форме идеализированных уравнений

⁵ Класса Numerical Tank

движения существенно различается для воспроизведения разных экстремальных ситуаций (что ограничивает области их применения), в данной работе использован прямой метод, основанный на вычислении главных сил и моментов непосредственным интегрированием по мгновенной погруженной поверхности корпуса объекта S :

$$\mathbf{F} = - \left[\iint_S p \mathbf{n} dS \right] - \left[\iint_S H \mathbf{v} dS \right] + \mathbf{D} + \mathbf{F}_{ext} \quad (1)$$

$$\mathbf{M} = - \left[\iint_S (p \mathbf{n}) \times (\mathbf{r} - \mathbf{p}) dS \right] - \left[\iint_S (H \mathbf{v}) \times (\mathbf{r} - \mathbf{p}) dS \right] + \mathbf{M}_{ext} \quad (2)$$

Здесь \mathbf{D} — весовое водоизмещение объекта, p — гидростатическое и гидродинамическое давление воды в точке, \mathbf{n} — нормаль к поверхности, \mathbf{r} — радиус-вектор точки поверхности в глобальных координатах, \mathbf{p} — положение объекта в пространстве, определяемое шестью степенями свободы, $H\mathbf{v}$ — демпфирующая сила, действующая на единицу поверхности корпуса объекта, \mathbf{v} — скорость частиц вдоль поверхности судна в точке интегрирования. \mathbf{F}_{ext} и \mathbf{M}_{ext} — дополнительные сила и момент (внешнее управление).

Сила \mathbf{F} и момент \mathbf{M} рассматриваются относительно редуцированных масс и моментов инерции объекта, включающих в себя собственные и присоединенные составляющие. Структура выражений для демпфирующей силы и гидродинамической составляющей давления соответствует ньютоновским принципам гидродинамики; коэффициенты пропорциональности определяются экспериментально по записям затухающих колебаний.

В каждый момент времени t граница погруженной поверхности $S(t)$ определяется, исходя из мгновенного профиля взволнованной поверхности моря, задаваемой моделью Лонге-Хиггинса, идентифицируемой по частотно-направленному спектру волнения $E(\mathbf{k})$, где \mathbf{k} — волновой вектор. Несмотря на относительно слабую сходимость модели, ее достоинством является возможность наглядной гидродинамической интерпретации с точки зрения определения волновых давлений p в терминах вертикальных смещений частиц жидкости h_w на глубине d :

$$h_w(t, \mathbf{p}, d) = \sum_{i,j} \exp(-|\mathbf{k}_{i,j}|d) a_{i,j} \cos(\mathbf{p} \cdot \mathbf{k}_{i,j} - \omega(\mathbf{k}_{i,j})t + \delta_{i,j}) \quad (3)$$

$$p(t, \mathbf{p}, d) = \gamma h_w(t, \mathbf{p}, d) + d\gamma \quad (4)$$

Здесь a_{ij} — коэффициенты модели Лонге-Хиггинса, определяются по спектру волнения, \mathbf{k} — волновой вектор, δ_{ij} — равномерно распределенные случайные фазы, $\omega = \omega(\mathbf{k})$ — дисперсионное соотношение для волн малой амплитуды, γ — объемный вес воды, \mathbf{p} — радиус-вектор произвольной точки в плоскости тихой воды.

Значения главных сил (1) и моментов (2) в каждый момент времени t позволяют определить пространственные линейную и угловую скорости перемещения судна. При этом модель (1–4) является достаточно удобной для целей интерактивной визуализации: она позволяет в реальном времени с достаточной точностью воспроизводить динамику МО с учетом всех шести степеней свободы.

Дополнительные сила и момент \mathbf{F}_{ext} и \mathbf{M}_{ext} в выражениях (1–2) используются для моделирования внешних воздействий (ветровой шквал, удар разрушающейся волны) и управляющих сил (перекладка руля, работа движителя). Как следствие, это позволяет придать задаче управления процессом визуализации в рамках модели (1–2) ясную физическую интерпретацию: нестационарные изменения режимов движения объекта (например, поворот на заданный курс) осуществляются путем приложения дополнительных сил, направление и интенсивность которых задается в сценарии модельного эксперимента или наблюдателем посредством манипулятора системы ВР.

Аналитическое вычисление значений выражений (1–2) при заданных характеристиках входных воздействий (4) возможно только для модельной формы корпуса, например, задаваемой эллипсоидом вращения. В общем случае при произвольной геометрии морского объекта соответствующие интегралы рассчитываются численно по квадратурным формулам типа Маркова с локально распределенными случайными узлами, перестраиваемыми на каждом шаге t . Такой подход позволяет компенсировать невязку, вызванную дискретным характером сетки, при аппроксимации непрерывно изменяющегося мгновенного профиля ватерлинии. Однако использование случайных сеток при интегрировании (1–2) приводит к *численному дрейфу* — незначительному, случайному на каждом шаге моделирования смещению судна под действием нескомпенсированных сил, возникающих по причине случайного распределения узлов. В табл. 1 приведены результаты оценки смещения (м) в продольном ξ и поперечном η направлениях для судна с длиной 40 м, шириной 7 м, осадкой 2 м в течение одной минуты модельного времени на тихой воде. Из таблицы видно, что численный дрейф, вносимый случайным характером сетки, незначителен. При достаточно высокой плотности точек численный дрейф не оказывает существенного влияния на процесс моделирования.

Таблица 1

Характеристики численного дрейфа в зависимости от размера сетки N

Кол-во узлов сетки (N)	500	1000	2000	4000
Ошибка по ξ , м	0.6	0.5	0.4	0.3
Ошибка по η , м	2.0	1.5	1.5	1.0
Скорость по ξ , м/с	0.01	0.008	0.007	0.005
Скорость по η , м/с	0.03	0.025	0.025	0.017
Плотность точек, $1/\text{м}^2$	1	2	4	8

Дополнительным преимуществом использования случайных сеток является возможность эффективной балансировки вычислительной нагрузки при распараллеливании вычислений интегралов в (1) и (2) за счет рандомизации выбора узлов из общей памяти.

Третья глава описывает архитектуру программно-аппаратного комплекса ВП и основные технологические приемы, используемые при формировании динамических сцен. В целом ВП предоставляет набор механизмов для проведения виртуальных экспериментов, которые обеспечивают настройку параметров моделирования, создание сценариев модельных экспериментов, интерактивную визуализацию результатов моделирования в моно- и стереорежимах, экспорт расчетных данных для последующей обработки в математических пакетах.

Программный комплекс ВП состоит из следующих программных компонентов:

- *Ядро* представляет собой фреймворк, включающий библиотеку математических функций, интерпретатор Lua, интерфейс операционной и файловой системы, систему конфигурирования, а также функционал для работы с устройствами ввода.
- *Библиотека поддержки визуализации* не зависит от используемого графического API и предоставляет функции по работе с изображениями, полигональными сетками и предрасчитанными анимациями (например, анимация камеры или механизированных элементов судна, таких как винты, рули, подвижные элементы надстройки).
- *Графическая подсистема* позволяет визуализировать собственно объекты, водную поверхность, отладочную информацию и текст, используя современные технологии синтеза высококачественного изображения (технологии освещения, построения теней, отражения, преломления и затуманивания по удалению).
- *Звуковая подсистема* обеспечивает воспроизведение как стерео- и квадрофонического звука, так и трехмерных позиционированных звуков с учетом эффекта Доплера и эффектов окружения (эхо, реверберация и т.д.).
- *Подсистема имитационного моделирования* представляет собой расширяемую библиотеку сущностей и параметров окружения. В число сущностей входят такие классы, как «Таймер» и «Корабль», к числу параметров окружения относятся параметры морского волнения. Также подсистема имитационного моделирования предоставляет ряд функций, которые могут быть использованы для написания сценариев на языке Lua и настройки интерактивного взаимодействия пользователя и ВП.

Технологии визуализации объектов в соответствии с заданным законом движения в настоящее время достаточно хорошо проработаны. Однако для создания эффекта «погружения» в ВП необходимо дополнительно отображать визуально бесконечную водную поверхность, простирающуюся от точки наблюдения до горизонта. С этой целью была применена технология неравномерных сеток, привязанных к камере. Она позволяет компоновать сеточную область из трех частей (рис. 1). Область «А» (дно) используется для

маркировки буфера трафарета при отображении раздела сред, область «В» (область интенсивного волнения) применяется для отображения собственно волн в соответствии с моделью (3), а область «С» (область горизонта) находится достаточно далеко от наблюдателя — в ней видимой высотой волн в процессе визуализации можно пренебречь. В процессе визуализации центр такой сетки всегда находится под или над камерой. Поворот камеры на ориентацию сетки в пространстве не влияет. Вертикальная координата вершин в области «В» модифицируется вершинным шейдером в соответствии с моделью волнения. При этом высота волн плавно уменьшается по мере увеличения расстояния от наблюдателя. Область интенсивного волнения формируется путем рекурсивного подразбиения центральной части сетки размером 4 x 4 ячейки с последующим сглаживанием методом Катмулла-Кларка. Такой подход создает непрерывный переход от областей с большей детализацией поверхности к областям с меньшей детализацией.

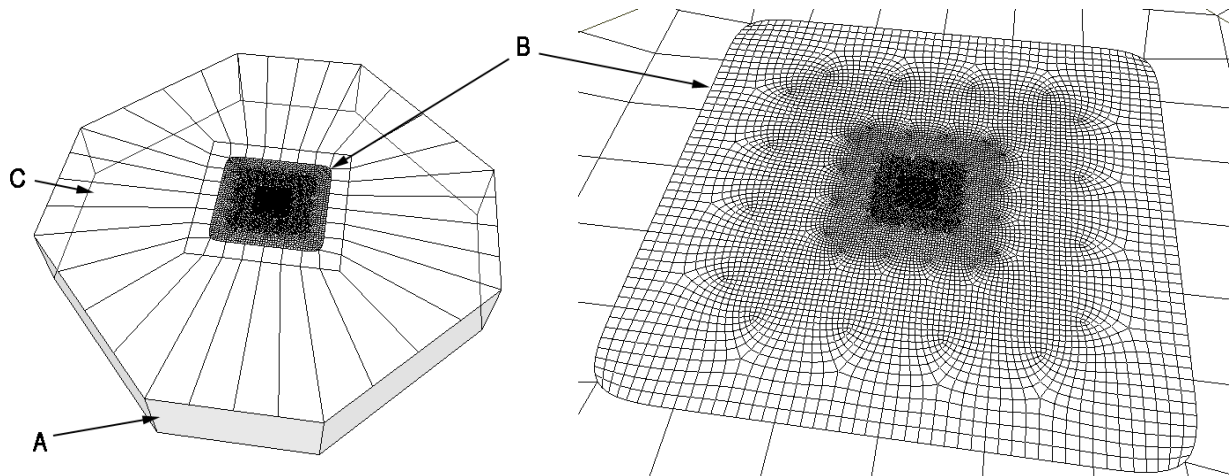


Рис. 1. Сетка для отображения морской поверхности.

Слева – общая структура сетки, справа – сетка области интенсивного волнения (обозначения – по тексту)

Ординаты взволнованной поверхности вычисляются по формуле (3) с использованием БПФ⁶ по технологии CUDA на GPU и передаются в вершинный шейдер как двумерная текстура. Дополнительно при закрасивании водной поверхности учитывается частичное отражение Френеля (только небо, см. рис. 1В), и частичное преломление с затуханием по глубине (см. рис. 1С). В рамках используемой технологии визуализации камера может находиться не только над водой, но и под водой, а также на границе сред. Для корректного отображения границы сред используется буфер трафарета с целью маркировки погруженной в воду плоскости экрана и последующим применением эффекта затуманивания (рис. 2А).

Дополнительным аспектом отображения визуальных свойств водной поверхности является воспроизведение расходящихся корабельных волн при движении плавучего МО. Поскольку нелинейная задача расчета корабельных волн в полной постановке является существенно более ресурсоемкой по

⁶ Быстрое преобразование Фурье

сравнению с моделью (1–4), для создания визуального эффекта используется упрощенная модель, основанная на решении линейного уравнения колебаний на регулярной сетке. Начальное возмущение формируется в точках пересечения корпуса судна и морской поверхности, а величина возмущения определяется в зависимости от локальной линейной скорости точки судна относительно поверхности воды. Уравнение решается на GPU, результат решения уравнения как набор значений в текстуре передается в вершинный шейдер, после чего высота колебаний добавляется к высоте волн. В тех областях, где скорость частиц колеблющейся поверхности выше определенного значения, поверхность моря окрашивается в белый цвет, что создает визуальный эффект пенообразования (рис. 2D).

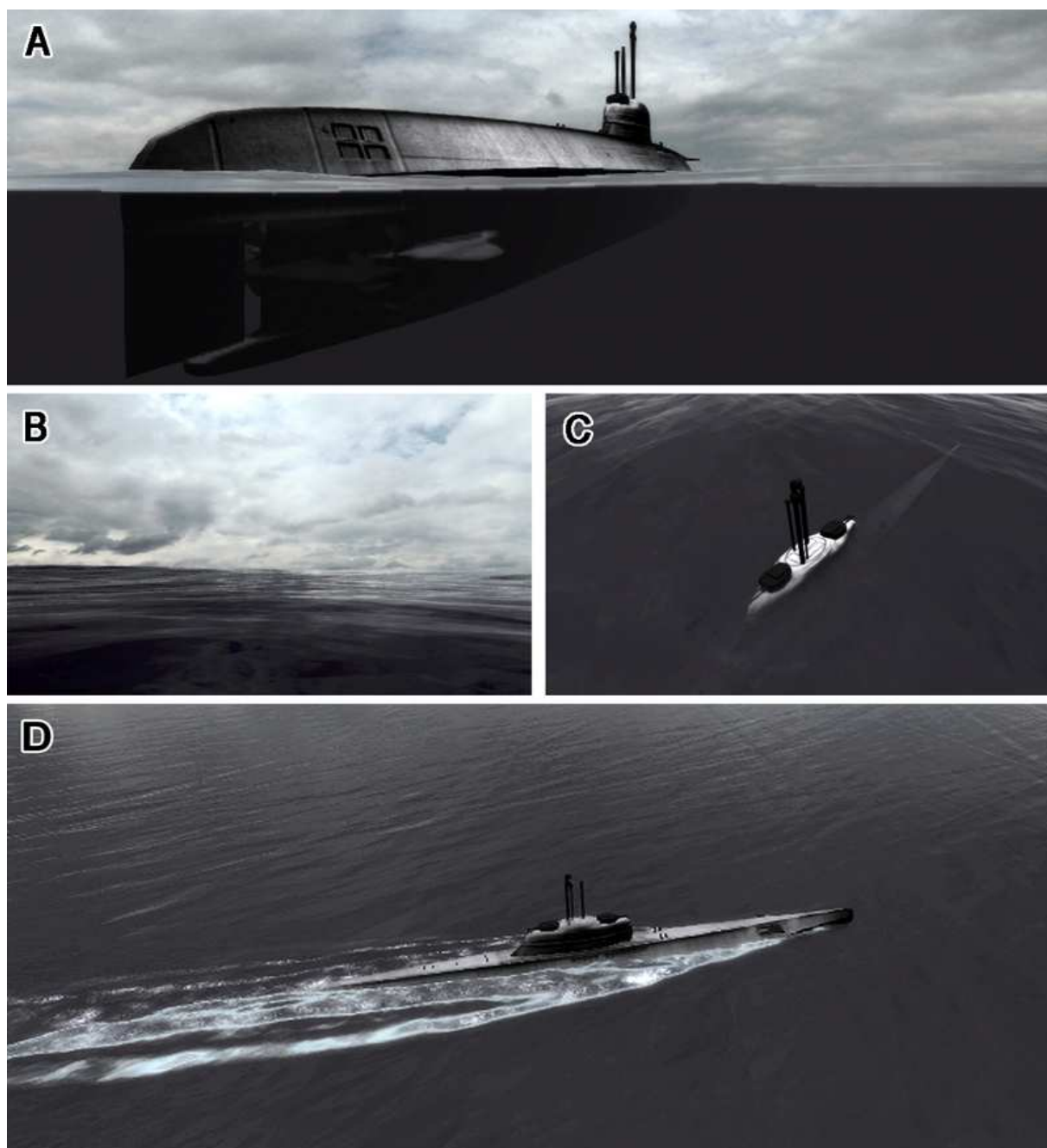


Рис. 2. Эффекты визуализации водной поверхности: раздел сред (A), отражение Френеля (B), затухание по глубине (C), корабельные волны (D)

Программный комплекс ВП развернут и апробирован на базе системы ВР ЦСМВ СПбГУ ИТМО. Система имеет недеполярирующий стерео-экран обратной проекции размером 3.35 x 2.0 м, изображение на котором формируется посредством шести HDTV DLP-проекторов Rohar Projectiondesign. Интерактивное взаимодействие с наблюдателем в системе ВР обеспечивается с помощью манипулятора с шестью степенями свободы производства 3dconnexion серии Space Pilot. Создание и подготовка стереоизображения выполняются на рабочей станции HP Z800 с видеокартой nVidia Quadro FX 5800. Оборудование ЦСМВ и вид зала во время работы ВП показаны на рис. 3.

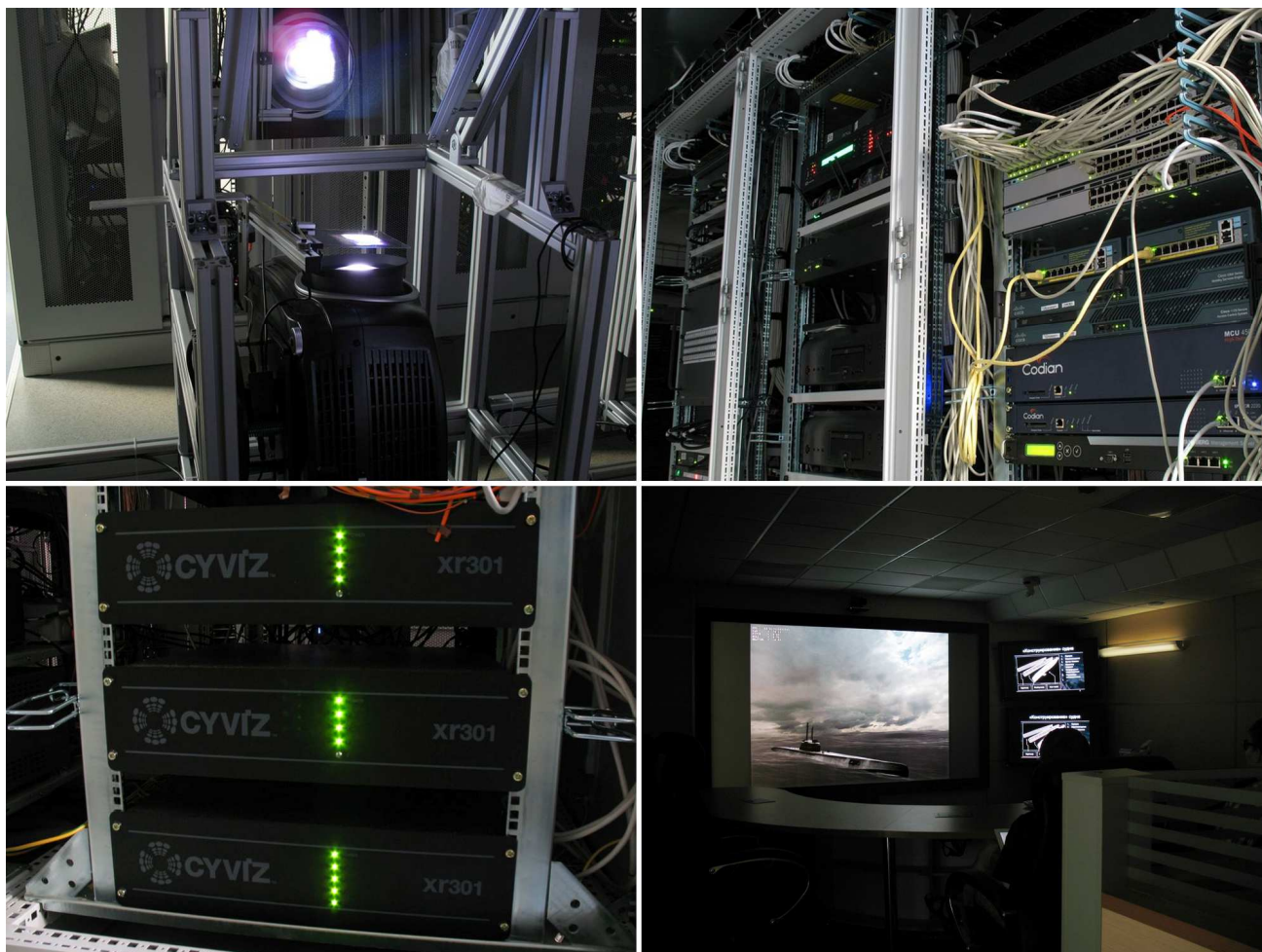


Рис. 3. Инфраструктура ЦСМВ СПбГУ ИТМО (слева направо, сверху вниз): один из шести проекторов; серверные стойки с оборудованием; видеопроцессоры; общий вид рабочего зала ЦСМВ при использовании ВП

Дополнительным аспектом адаптации разработанной технологии к особенностям широкоэкранных систем ВР является 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 визуальнo ощутимо на небольшом расстоянии от экрана. Для того, чтобы устранить этот эффект и сделать изображение более реалистичным, применен метод морфологического сглаживания (Morphological Antialiasing, MLAA), который заключается в

анализе неразрывности изображения с последующим избирательным по направлению сглаживанием разрывов.

Испытания программно-аппаратного комплекса ВП продемонстрировали его принципиальную работоспособность на инфраструктуре ЦСМВ СПбГУ ИТМО с возможностью воспроизведения различных экстремальных ситуаций в динамике МО и интерактивным управлением ходом эксперимента в реальном масштабе времени.

Четвертая глава посвящена апробации ВП путем проведения численных экспериментов по исследованию экстремальной динамики МО в режиме основного и параметрического резонансов, а также в условиях броуновского движения.

Резонансные явления являются одной из наиболее характерных причин экстремальных ситуаций, связанных с интенсивными колебаниями МО в одной или нескольких плоскостях. Сама по себе сильная качка не представляет существенной угрозы для неповрежденного судна, но сказывается на обитаемости и эксплуатационных характеристиках. Однако нахождение судна в режиме основного или параметрического 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 слеминг⁷ и пр. Избежать резонансных условий позволяет изменение скорости и (или) курса судна, обычно осуществляемое согласно операционной диаграмме.

Основной резонанс (ОР) качки обусловлен близостью характерных периодов волнения и собственных колебаний судна и хорошо предсказуем даже в линейном приближении. Напротив, параметрические резонансы (ПР) имеют более тонкую природу, связанную со взаимовлиянием различных видов качки; условия их возникновения не всегда очевидны. На рис. 4 представлены обобщенные результаты численных экспериментов, проведенных на ВП, в форме АЧХ⁸ бортовых колебаний МО лагом к волне, полученных при различных параметрах волнения. В силу того, что высота и период волн связаны регрессионной зависимостью, результаты расчетов представлены в безразмерном виде (в нормировке квантили амплитуды качки 90% вероятности $\theta_{90\%}$ на СКО⁹ угла волнового склона). На графике присутствуют два пика, один из которых соответствует основному резонансу (частота колебаний равна частоте максимума спектра волн), а другой — параметрическому (частота максимума спектра волн в два раза больше частоты колебаний судна). Дополнительно на рис. 4 приведены аппроксимации результатов компьютерного эксперимента функцией Коши (для линейных систем) с отображением таких характеристик системы, как добротность Q и пиковая амплитуда A . На основании формы пика можно сделать вывод о большей частотной избирательности МО как колебательной системы в режиме параметрического резонанса бортовой качки лагом к волне.

⁷ Гидродинамический удар носовой части судна при продольной качке

⁸ Амплитудно-частотная характеристика

⁹ Среднеквадратичное отклонение

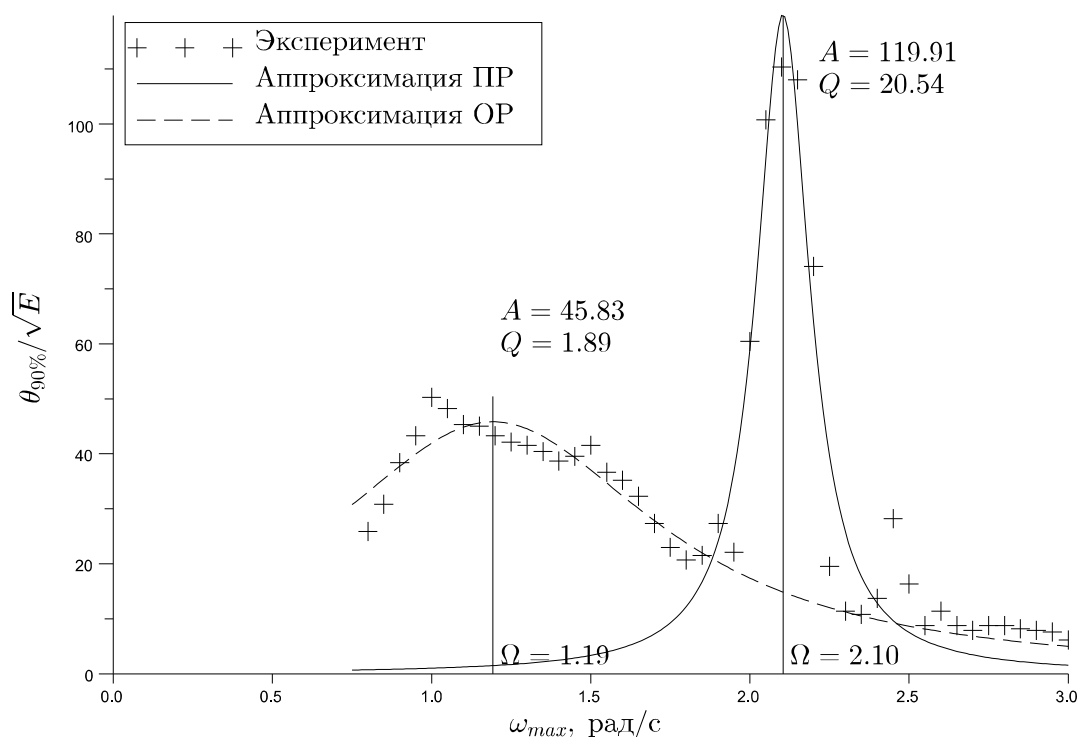


Рис. 4. АЧХ МО в режиме параметрического резонанса бортовой качки лагом к волне

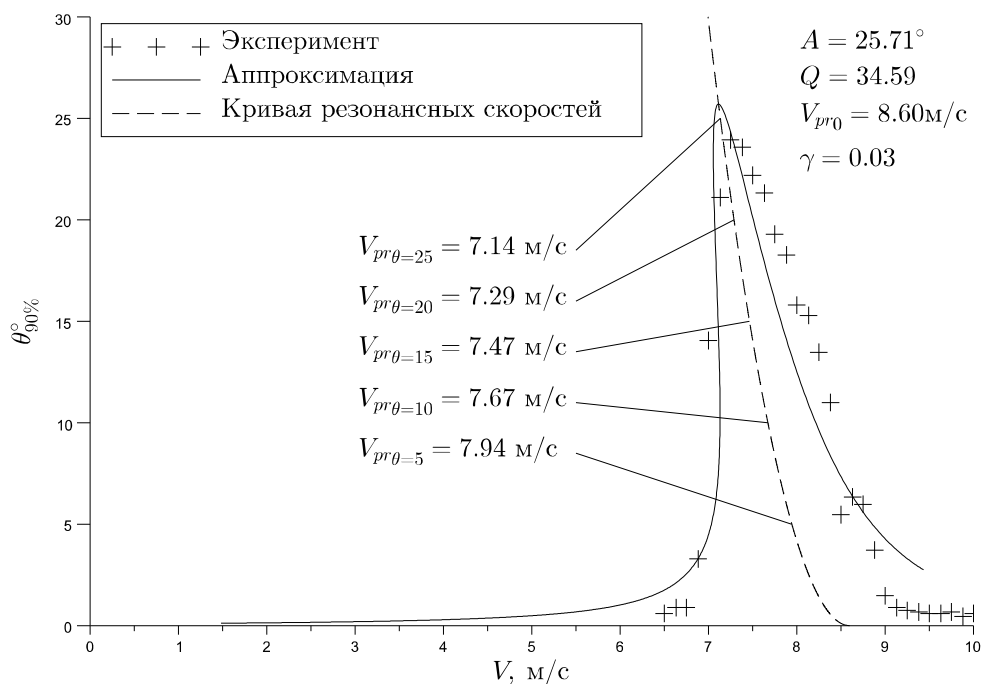


Рис. 5. АЧХ МО в режиме параметрического резонанса бортовой качки на встречном волнении

На рис. 5 приведены результаты компьютерного моделирования возникновения параметрического резонанса на встречном волнении в форме АЧХ бортовых колебаний при разных значениях скорости МО, при этом параметры морского волнения не менялись. Результаты расчетов показывают высокую степень избирательности судна как колебательной системы в режиме

параметрического резонанса бортовой качки на встречном волнении, а также демонстрируют нелинейный эффект, связанный со снижением резонансной скорости по мере роста амплитуды качки.

На рис. 6 приведен пример компьютерного эксперимента по воспроизведению эффекта брочинга — неуправляемого разворота судна лагом к волне, сопровождаемого сильным динамическим креном.



Рис. 6. Судно класса «буксир» в условиях брочинга (неуправляемый захват объекта волной)

Поскольку брочинг является нестационарным процессом, для анализа его воспроизводимости в условиях ВП рассматривалась выборка из 200 экспериментов с одинаковыми начальными условиями, но различными случайными реализациями поля волнения, что позволило классифицировать и описать основные условия его возникновения, исходя из диаграммы курса, угла крена, угловой скорости и высоты волны в точке, где находится судно. Пример типовой траектории судна и параметров волнения в условиях брочинга представлен на рис. 7.

Таким образом, результаты проведенных компьютерных экспериментов демонстрируют способность ВП воспроизводить такие существенно нелинейные режимы качки МО, как параметрические резонансы и брочинг, формирующие условия для возникновения экстремальных ситуаций при эксплуатации МО.

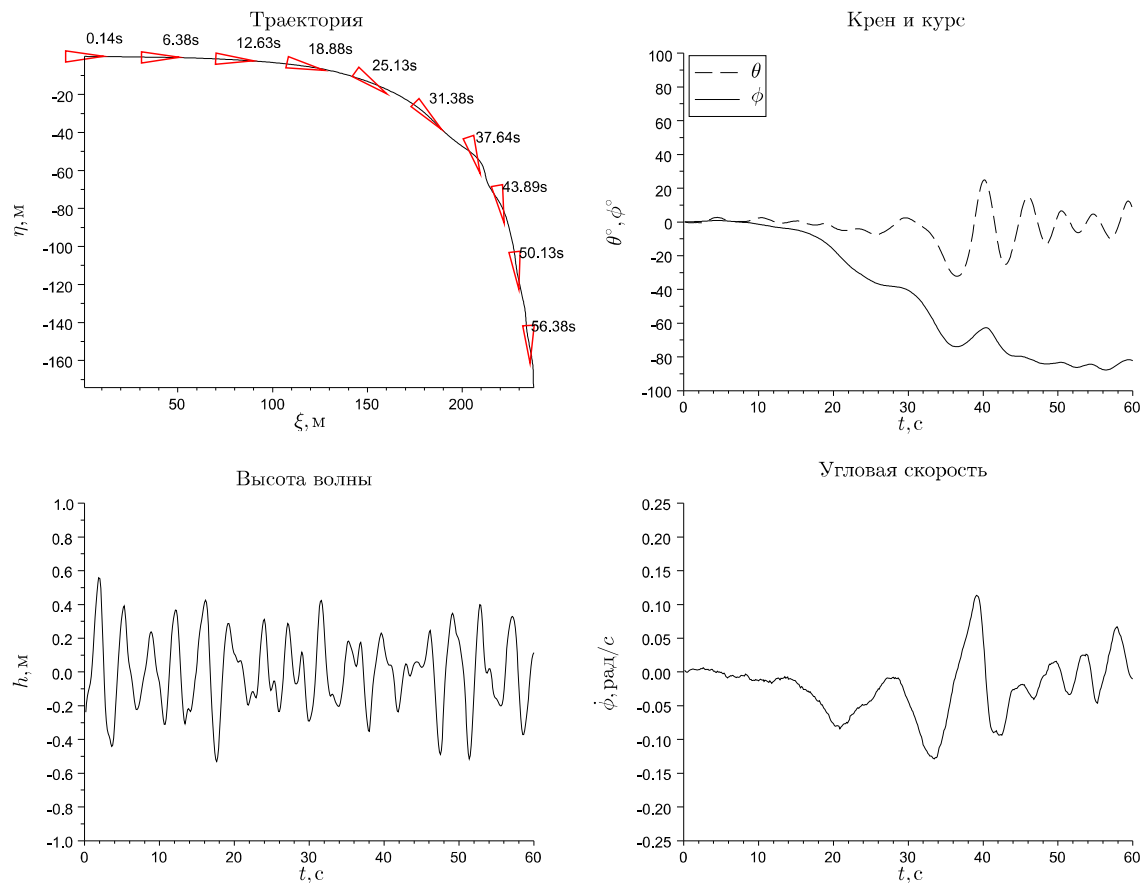


Рис. 7. Временные диаграммы параметров волнения, курса, угла крена, и типовая траектория судна в условиях брочинга

Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем:

- 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 широкоэкранных 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.

Публикации по теме диссертационной работы

1. Виртуальный полигон для исследования экстремальной динамики морских объектов на нерегулярном волнении [Текст] / Безгодов А.А., Бухановский А.В. // Известия вузов. Приборостроение. — 2011. — №05. — с. 98–100. **[входит в перечень ВАК]**
2. Визуализация динамики морских объектов в широкоэкранных системах виртуальной реальности [Текст] / Безгодов А.А., Загарских А.С., Бухановский А.В. // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО / СПбГУ ИТМО. — 2011. — Выпуск 73. — с. 84–88. **[входит в перечень ВАК]**
3. Высокопроизводительный программный комплекс моделирования динамики морских объектов в экстремальных условиях эксплуатации [Текст] / Безгодов А.А., Иванов С.В., Бухановский А.В. // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. — 2010. — Выпуск 70. — с. 125–127. **[входит в перечень ВАК]**
4. Реализация модели освещения Кука-Торренса с использованием технологии Deferred Shading [Текст] / Безгодов А.А., Стародубцев Э.В. // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. — 2008. — Выпуск 56. — с. 34–44. **[входит в перечень ВАК]**
5. Многослойное рельефное текстурирование: решение вопросов фильтрации и построения мягких теней [Текст] / Безгодов А.А. // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. — 2007. — Выпуск 39. — с. 130–140.
6. Модульный подход к построению визуализаторов для компьютерных моделей сложных систем // Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах. [Текст] / Иванов С.В., Безгодов А.А. // Материалы Девятой международной конференции-семинара. Владимир, 2–3 ноября 2009 г. — с. 186–190.
7. Разработка языка сценариев для систем виртуальной реальности [Текст] / Безгодов А.А., Тропченко А.Ю. // Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции «Интеллектуальные и информационные системы». — Тула, 18–19 ноября 2009 г. — ТГУ. — с. 154–157.
8. Обратные задачи динамики корабля для визуализации экстремальных ситуаций в бортовых системах поддержки принятия решений судоводителя [Текст] / Безгодов А.А., Иванов С.В., Бухановский А.В. // Сборник трудов XVII Всероссийской научно-методической конференции «Телематика 2010». — Санкт-Петербург, 21–24 июня 2010 г. — с. 204–205.
9. Высокопроизводительный программный комплекс моделирования экстремальной динамики морских плавучих объектов [Текст] / Безгодов А.А., Иванов С.В., Косухин С.С. // Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах (НРС-2010): Материалы X Международной конференции: г. Пермь, 1–3 ноября 2010 г. / Пермский государственный технический университет. — Пермь, 2010. — с. 70–76.
10. Высокопроизводительный программный комплекс моделирования динамики корабля в экстремальных условиях эксплуатации «ShipX-DS». Безгодов А.А., Иванов С.В., Бухановский А.В. // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2011611381. — 2011.