

---

---

# ПРИЛОЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СРЕД НА ОСНОВЕ iPSE

---

---

УДК 004.925;004.942;004.946

А. А. БЕЗГОДОВ, С. В. ИВАНОВ, С. С. КОСУХИН, А. В. БУХАНОВСКИЙ

## ВИРТУАЛЬНЫЙ ПОЛИГОН ДЛЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ И СООРУЖЕНИЙ

Рассмотрена задача организации виртуального полигона для задач исследовательского проектирования в судостроении. Разработан метод формирования динамических сцен поведения морских объектов на трехмерном волнении при экстремальных условиях эксплуатации, адаптированный для использования в широкоэкранных системах виртуальной реальности.

*Ключевые слова:* виртуальный полигон, исследовательское проектирование, экстремальная ситуация, трехмерное волнение.

**Введение.** Исследовательское проектирование морских объектов (МО) связано с обеспечением конструктора необходимой информацией при разработке и принятии конкретных решений в процессе оценки характеристик проектируемого объекта для различных условий эксплуатации, в том числе — экстремальных ситуаций при неопределенности и неполноте исходной информации [1]. Несмотря на то что развитие экстремальной ситуации является сложным многовариантным процессом, ретроспективный анализ известных инцидентов позволяет выявить обстоятельства, способствующие их возникновению, например, параметрические резонансы разной природы [2], потеря управляемости на гребне волны, захват судна волной (брочинг) [3]. В свою очередь, каждая 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 ограничивают возможности физического эксперимента, поэтому требуется развивать соответствующие средства компьютерного моделирования динамики МО под воздействием внешних возмущений.

Подходы к компьютерному моделированию динамики морских объектов можно условно разделить на два конкурирующих класса: использование нелинейных моделей на основе интегрирования уравнений движения [4] и имитационных моделей динамики судна в прямой гидромеханической постановке решения задач гидромеханики [5]. Модели на основе уравнений движения в основном адаптированы под отдельные классы экстремальных задач за счет введения соответствующих нелинейных членов; они не обеспечивают необходимой гибкости управления при проведении компьютерного эксперимента. Напротив, полные гидродинамические модели, основанные на численном решении уравнений Навье—Стокса, лишены этого недостатка; однако их реализация требует существенно больших ресурсов.

Проблема выбора и применения математической модели для реализации инструментальных средств поддержки исследовательского проектирования связана с используемой парадигмой человеко-компьютерного взаимодействия. Так, технология виртуальной реальности (ВР) обеспечивает визуальное восприятие конструктором особенностей поведения МО, создавая эффект погружения в моделируемое явление с возможностью всестороннего наблюдения и анализа воспроизводимых закономерностей [6]. Технологическая реализация такого подхода стимулирует развитие нового класса комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента — виртуальных полигонов (ВП) [7, 8]. В настоящей статье рассматриваются особенности ВП для исследовательского проектирования МО.

**Компьютерное моделирование динамики морского объекта под воздействием внешних возмущений.** Реалистичная визуализация динамики МО в режиме реального времени требует применения адаптированных моделей и методов, ориентированных на воспроизведение качественных эффектов с разумным уровнем точности для широкого диапазона условий эксперимента, с временными затратами, обеспечивающими использование в интерактивном режиме. Поскольку структура традиционных моделей динамики МО в форме идеализированных уравнений движения для воспроизведения разных экстремальных ситуаций существенно различается (что ограничивает области их применения), при создании ВП был использован прямой метод, основанный на вычислении главных сил и моментов непосредственным интегрированием по мгновенной погруженной поверхности корпуса объекта  $S$ :

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

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

Здесь  $\mathbf{D}$  — весовое водоизмещение объекта,  $p$  — гидростатическое и гидродинамическое давление воды в заданной 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,  $\mathbf{F}_{\text{ext}}$  и  $\mathbf{M}_{\text{ext}}$  — дополнительные сила и момент (внешнее управление).

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 профиля мгновенной ватерлинии.

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 [9], идентифицируемой по частотно-направленному спектру волнения  $E(\mathbf{k})$ , где  $\mathbf{k}$  — волновой вектор. Достоинством модели (несмотря на ее относительно слабую сходимость) является возможность наглядной гидродинамической интерпретации с точки зрения определения волновых давлений в терминах вертикальных смещений частиц жидкости на глубине  $d$ :

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

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

Значения главных сил (1) и моментов (2) в каждый момент времени  $t$  позволяют определить пространственные линейную и угловую скорость перемещения судна. При этом модель (1)—(3) является достаточно удобной для интерактивной визуализации: она позволяет в режиме реального времени с приемлемой точностью воспроизводить динамику МО с учетом всех шести степеней свободы.

Дополнительные сила и момент  $\mathbf{F}_{\text{ext}}$  и  $\mathbf{M}_{\text{ext}}$  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 (1), (2) ясную физическую интерпретацию: нестационарные изменения режимов движения объекта (например, поворот на заданный курс) осуществляются за счет приложения дополнительных сил, направление и интенсивность которых задаются в сценарии модельного эксперимента либо наблюдателем посредством манипулятора системы ВР.

**Технология формирования динамических сцен в виртуальном полигоне.** ВП представляет собой совокупность программных механизмов для проведения виртуальных экспериментов, которые обеспечивают:

- настройку параметров моделирования,
- создание сценариев модельных экспериментов,
- интерактивную визуализацию результатов компьютерного эксперимента в моно- и стереорежиме,
- экспорт расчетных данных для последующей обработки в пакетах математического моделирования и проектирования.

Специфика интерактивной визуализации связана с обеспечением эффекта погружения конструктора в ВП, что в данном случае требует отображать (помимо МО) визуально бесконечную водную поверхность, простирающуюся от точки наблюдения до горизонта. С этой целью была применена технология неравномерных сеток, привязанных к камере (рис. 1, *a* — общая структура сетки, *b* — сетка области интенсивного волнения). Она позволяет компоновать сеточную область из трех частей.

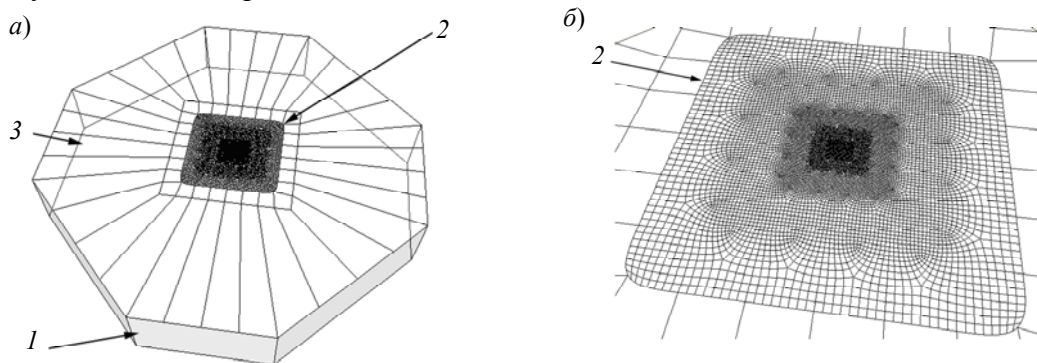


Рис. 1

Область 1 (дно) используется для маркировки буфера трафарета при отображении раздела сред, область 2 (т.н. область интенсивного волнения) применяется для отображения собственно волн в соответствии с моделью (3), а 3 (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 камерой или над ней. Повороты камеры на ориентацию сетки в пространстве не влияют. Вертикальная координата вершин в области 2 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  $4 \times 4$  ячейки с последующим сглаживанием методом Катмулла—Кларка. Такой подход обеспечивает непрерывный переход от областей с большей детализацией поверхности к областям с меньшей детализацией. Ординаты взволнованной поверхности вычисляются по модели (3) с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ) по технологии CUDA на GPU и передаются в вершинный шейдер как двумерная текстура. Дополнительно при закрасивании водной поверхности учитываются частичное отражение Френеля (только небо, рис. 2, б) и частичное преломление с затуханием по глубине (рис. 2, в). В рамках используемой технологии визуализации камера может находиться не только над, но и под водой, а также на границе сред. Для корректного отображения границы сред при визуализации морской поверхности используется буфер трафарета для маркировки погруженной в воду плоскости экрана, с последующим применением эффекта затуманивания (см. рис. 2, а).

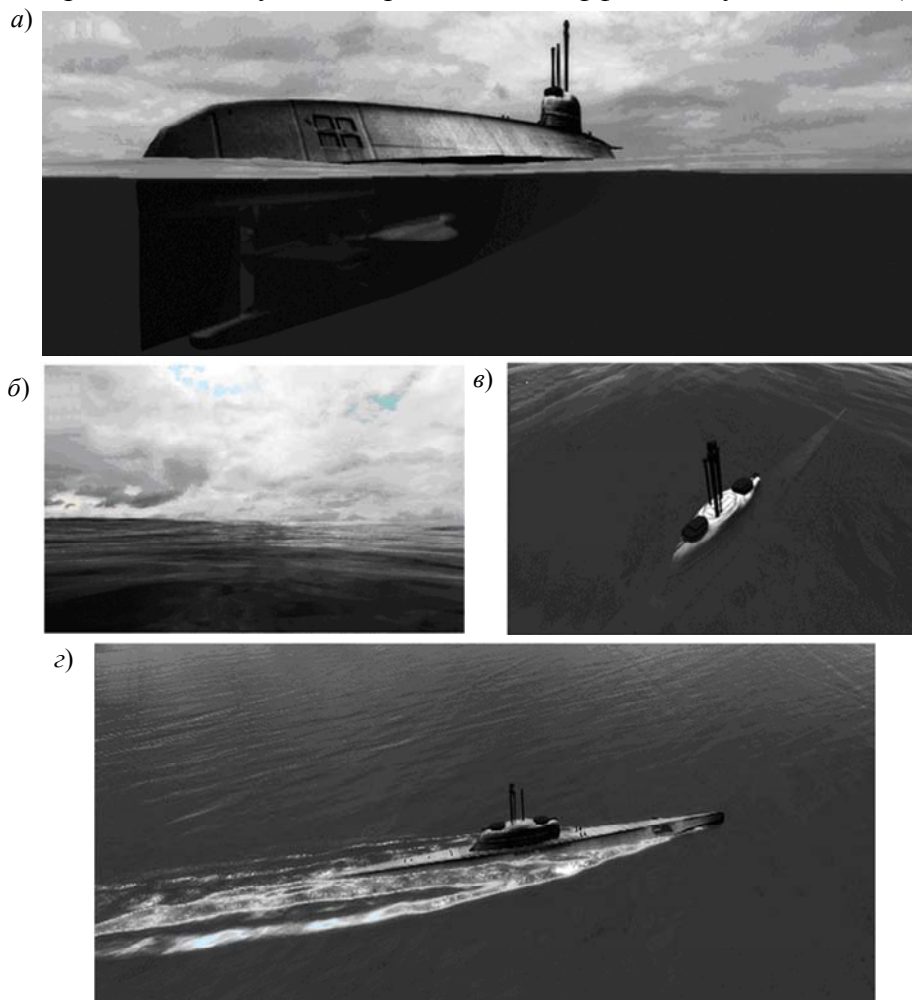


Рис. 2

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 сравнению с моделью (1)—(3), 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, и 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. 2, з).

**Моделирование динамики судна в режимах параметрического резонанса и брочинга с помощью виртуального полигона.** Программный комплекс ВП развернут и апробирован на базе системы ВР Центра ситуационного моделирования и визуализации СПбГУ ИТМО. Система имеет недеполяризующий стереозэкран обратной проекции размером 3,35×2,0 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 подготовку стереоизображения обеспечивает рабочая станция HP Z800 с видеокартой nVidia Quadro FX 5800.

ВП позволяет моделировать эксперименты, связанные, в первую очередь, с возникновением сильной качки МО, вызванной резонансными явлениями разного рода. Основной резонанс качки обусловлен близостью характерных периодов волнения и собственных колебаний судна и хорошо предсказуем даже в линейном приближении. Напротив, параметрические резонансы имеют более тонкую природу, связанную с взаимовлиянием различных видов качки; условия их возникновения не всегда очевидны. К аналогичному классу явлений относится брочинг — неуправляемый разворот судна лагом к волне, сопровождаемый сильным динамическим креном. Поскольку брочинг является нестационарным процессом, для анализа его воспроизводимости в условиях ВП (рис. 3, а) необходимо создавать выборку экспериментов с одинаковыми начальными условиями (но различными случайными реализациями поля волнения), что позволило классифицировать и описать основные условия его возникновения исходя из диаграммы курса  $\varphi$ , угла крена  $\theta$  (рис. 3, в), угловой скорости  $\dot{\varphi}$  (рис. 3, д) и высоты волны в точке, где находится судно (рис. 3, з). На рис. 3, б представлена траектория судна, цифры у кривой — время (в секундах).



Рис. 3, а

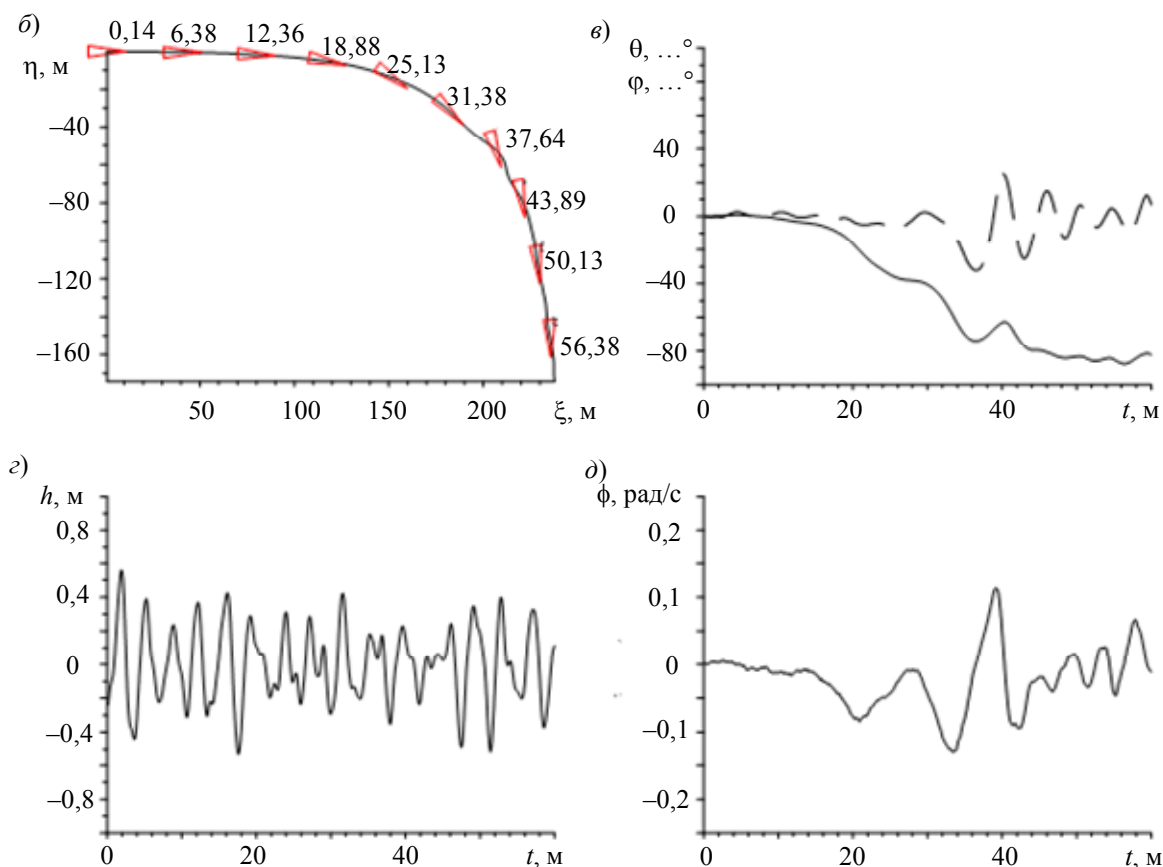


Рис. 3

Таким образом, разработанная технология ВП позволяет эффективно формировать динамические сцены на основе численного моделирования динамики внешней среды и МО, с учетом графических эффектов визуализации взволнованной поверхности моря и ее взаимодействия с корпусом объекта. Она адаптирована для применения в широкоэкранных системах ВР и дает возможность проведения компьютерных экспериментов по оценке динамических характеристик проектируемого объекта в экстремальных условиях эксплуатации.

Работа выполнена в рамках проектов по реализации Постановлений № 218 и 220 Правительства Российской Федерации при поддержке ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009—2013 гг.“.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Интеллектуальные системы в морских исследованиях и технологиях / Под ред. Ю. И. Нечаева. СПб: ГМТУ, 2001. 352 с.
2. France W. N., Levadou M., Treacle 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. 2003. Vol. 40, N 1. P. 1—19.
3. Нечаев Ю. И., Завьялова О. П. Экстремальная ситуация „бродячий“: анализ и критериальные оценки условий „захвата“ и опрокидывания судна // Морской вестник. 2004. № 1(9). С. 87—92.
4. Sutulo S., Guedes Soares C. An implementation of the method of auxiliary state variables for solving seakeeping problems // Intern. Shipbuild. Progr. 2005. Vol. 52, N 4. P. 357—384.
5. Wu G. X., Hu Z. Z. Simulation of nonlinear interactions between waves and floating bodies through a finite-element-based numerical tank // Proc. Royal Soc. A: Math. Phys. and Eng. Sci. 2004. Vol. 460 (2050). P. 2797—2817.



6. Клименко С. В., Никитин И. Н., Никитина Л. Д. Аванго — система разработки виртуальных окружений. М.: Изд-во МФТИ — М.-Протвино, 2006. 252 с.
7. Charles W. Brice, Levent U. Gokdere, Roger A. Dougal. The Virtual Test Bed: An Environment for Virtual Prototyping // Proc. Intern. Conf. on Electric Ship (ElecShip'98). 1998. P. 27—31.
8. Bardina J., Rajkumar T. Intelligent Launch and Range Operations Virtual Test Bed (ILRO-VTB) // Proc. Enabling Techn. for Simulation Sci. VII. Vol. 5091. P.141—148.
9. Лонге-Хиггинс М. С. Статистический анализ случайной движущейся поверхности // Ветровые волны. М.: ИЛ, 1962. С. 112—230.

**Сведения об авторах****Алексей Алексеевич Безгодов**

— НИИ Научно-технических компьютерных технологий Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики; младший научный сотрудник;  
E-mail: demiurghg@gmail.com

**Сергей Владимирович Иванов**

— канд. техн. наук; НИИ Научно-технических компьютерных технологий Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики; старший научный сотрудник; E-mail: Sergey.v.ivanov@rambler.ru

**Сергей Сергеевич Косухин**

— НИИ Научно-технических компьютерных технологий Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики; младший научный сотрудник;  
E-mail: skosukhin@gmail.com

**Александр Валерьевич Бухановский**

— д-р техн. наук, профессор; НИИ Научно-технических компьютерных технологий Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики; директор;  
E-mail: avb\_mail@mail.ru

Рекомендована НИИ НКТ

Поступила в редакцию  
15.05.11 г.