

DIRECT COMPUTATIONAL EXPERIMENT IN STORM HYDRODYNAMICS OF MARINE OBJECTS

Alexander Degtyarev¹, Ivan Gankevich¹, Vasily Khramushin^{1,2}

1) Saint Petersburg State University, 13B Universitetskaya Emb., Saint Petersburg, 199034, Russia

2) Storm seaworthiness subsection of the A.N.Krylov Scientific and Technical Society of Shipbuilders, 44 Nevsky avenue, Saint-Petersburg, 191186, Russia.

E-mail: i.gankevich@spbu.ru

The paper presents and discusses a new computer toolkit for assessing the seaworthiness of a ship in stormy sailing conditions, intended for testing new design solutions for promising ocean-going ships and ships of unlimited ocean navigation, as well as organizing full-function simulators. The presented toolkit can be used by captains to select effective and safe sailing modes, as well as to train personnel. A modern computational experiment allows direct modeling of intense sea waves, which fully recreates the hydromechanics of external influences on the ship, and ensures its full positioning relative to the crests of storm waves. Such experiments require the use of high-performance computing technology based on GPGPU, as well as distributed data preparation and processing. Parameters of three structures of real sea waves, including extremely high heights, are determined as the initial conditions for modeling. The ship also possesses real dynamic characteristics, and she is capable to go by arbitrary courses in relation to waves. The possibility of dynamically changing the parameters of the ship during the experiment is provided. It is required to assess the motion state in various cases of ship loading, including emergency. The most important feature of the software is a full-fledged three-dimensional visualization of all storm waves, as well as the spatial position and trajectory of the ship and its parameters. A special experimental environment for engineering surveys for projected ships is created using the graphical tools of OpenGL. This computer toolkit is considered within the framework of the concept of a virtual testbed.

Keywords: hydromechanics, direct computational experiment, ship design, efficiency of storm navigation of a ship

Alexander Degtyarev, Ivan Gankevich, Vasily Khramushin

Copyright © 2021 for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

ПРЯМОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ В ШТОРМОВОЙ ГИДРОДИНАМИКЕ КОРАБЛЯ, ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ОБЩЕКОРАБЕЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРЫ

А. Б. Дегтярев¹, И. В. Ганкевич¹, В. Н. Храмушин^{1,2}

- 1) Кафедра компьютерного моделирования и многопроцессорных систем, факультет Прикладной математики – процессов управления СПбГУ.
- 2) Подсекция мореходных качеств судов в штормовых условиях, Российское Научно-техническое общество судостроителей им. А.Н.Крылова

E-mail: i.gankevich@spbu.ru

В работе представляется и обсуждается новый вычислительный инструментарий для экспериментальной апробации мореходных качеств корабля в условиях штормового плавания, предназначенный для использования на этапах проектирования перспективного океанского флота, и который может быть полезен в навигационной практике для обоснования эффективных и безопасных режимов хода в условиях интенсивного волнения, а также для обучения штурманского состава безопасным и эффективным методам штормового судовождения. Эффективность прямого вычислительного эксперимента определяется включением главной части гидродинамического воздействия трохoidalных волн на корпус корабля, без ограничений высоты морских волн и с полной динамикой корабля в поступательных и вращательных движениях, включая дельфинирование, брочинг или опрокидывание. Начальными и граничными условиями моделирования определяются характеристики трёх групповых структур морского волнения, без ограничения крутизны волн. Кинематическая модель перемещений и качки корпуса настроена на управляемое движение корабля произвольными курсами относительно штормового волнения. Числовая модель корабля обладает реальными динамическими характеристиками, с возможностью их изменения в процессе эксперимента, что требуется для выявления аварийных режимов штормового хода, и может востребоваться в предотвращении морских катастроф. Подобные вычислительные эксперименты востребуют высокопроизводительные технологии на основе GPGPU, с распределенной подготовкой и динамической обработкой массивов данных. Важной особенностью является трехмерная визуализация средствами OpenGL в режиме реального времени для всех штормовых волн, включая пространственное положение и траекторию движения корабля, с числовым и графическим представлением процессов штормовой качки во времени. Данный компьютерный инструментарий рассматривается в рамках концепции виртуального морского полигона.

Ключевые слова: гидромеханика, прямой вычислительный эксперимент, проектирование корабля, эффективность штормового плавания корабля.

Alexander Degtyarev, Ivan Gankevich, Vasily Khramushin

Copyright © 2021 for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

1. Введение

В работе представляется и обсуждается вычислительный инструментарий для оценки мореходных качеств корабля в условиях штормового плавания, предназначенный к апробации новых проектных решений для перспективных океанских кораблей и судов неограниченного океанского плавания [1], и который может использоваться капитанами для подбора эффективных и безопасных режимов плавания действующего флота, в том числе для снижения заливаемости палуб, уменьшения размаха штормовой качки, и создания в целом комфортных условий обитания и сохранности грузов на борту корабля.

Основное внимание в работе обращается на построение и оптимизацию алгоритмов для проведения интерактивных вычислительных экспериментов с использованием пространственной графики современных многопроцессорных компьютеров.

1.1 Список основных обозначений

Volume – водоизмещение корабля; vW – погруженный объем корпуса; $\vec{v}B$ – текущие координаты центра величины и $\vec{Gravity}$ – фиксированного центра тяжести; \vec{B} – вектор архимедовых сил всплытия; \vec{iV} – вектор нормали к склону волны; \vec{V} – вектор скоростей поступательных и $\vec{\Omega}$ – угловых колебаний; $inMass$ – массовый (объемный) тензор инерции корабля; $\overset{x}{r}$ – корабельный базис; \vec{R} – плечо расхождения центров величины и тяжести.

2. Вычислительный эксперимент в гидромеханике корабля

Современный вычислительный эксперимент позволяет проводить прямое трехмерное моделирование штормового волнения на море [2], полноценно воссоздающего гидромеханику внешних силовых воздействий на поверхности моря, что крайне необходимо для воссоздания реальных сценариев позиционирования надводного относительно гребней штормовых волн. В качестве исходных и начальных условий в работе задействуется моделирование трех структур реального ветрового волнения и зыби, в том числе предельно большой высоты с крутыми гребнями обрушающихся девятых валов. Виртуальная модель корабля строится в полномасштабных цифровых теоретических чертежах с охватом надводной общекорабельной архитектуры, со свойственными массовыми и динамическими характеристиками, включая тягу условных движителей и рулевых устройств для свободного маневрирования в условиях интенсивного воздействия штормового волнения. Исходными этапами разработки предусматривается возможность динамического изменения аппликаты центра тяжести непосредственно в процессе эксперимента, что необходимо для оценок характера и интенсивности качки корабля в различных режимах штормового плавания, и может использоваться для возврата корпуса на киль в случае аварийного опрокидывания.

2.1 Обоснование проектных решений по комплексу программ

В проектировании вычислительного эксперимента изначально не было определённости с выбором математических моделей гидромеханики в условиях интенсивной качки и возможного опрокидывания корабля на предельно высоком штормовом волнении. Требовалась поэтапная практическая отработка прямого численного моделирования, и потому для проверки результатов вычислительных экспериментов были созданы два дополнительных программных комплекса для изучения особенностей штормового трохoidalного волнения «Wave» [2], и для реализации всего комплекса традиционных гидростатических расчетов в теории корабля «Hull»: диаграмм остойчивости и кривых элементов теоретического чертежа, с включением доступных алгоритмов для расчетов корабельного волнообразования и волнового сопротивления на различных скоростях хода. Предполагается, что корабельное волнообразование и воздействие штормовых волн на корпус корабля имеют схожую физическую природу с одинаковым математическим описанием [1] в форме интеграла

Мичелла. Программа «Hull» также ориентирована на ведение базы данных цифровых теоретических чертежей [3] с возможностью их трансформации, а также для построения иных вариантов аналитических обводов и формы корпуса гипотетических судов.

Эти интерактивные процедуры позволили отработать геометрические построения и кинематические алгоритмы для основного вычислительного эксперимента в дружественной графической среде с использованием традиционных и хорошо проверенных теоретических методик и математических моделей.

2.2 Особенности реализации прямого вычислительного эксперимента

Ключевым параметром вычислительного эксперимента является расчетный шаг во времени, из расчётов с которым строятся геометрические и кинематические аппроксимации в гидромеханике силового взаимодействия корпуса корабля с предельно интенсивным штормовым волнением. По аналогии с волновым критерием Куранта в расчётных алгоритмах контролируется, насколько это возможно, ограничение величин смещений граней числовых ячеек и малых фрагментов судовой обшивки строго в пределах шага пространственных сеток для каждого расчётного цикла во времени.

Другим важным критерием является требование малости трансформации всех пространственных числовых объектов, внешних источников волнения и, что наиболее чувствительно, соблюдение плавности изменения форм и устойчивой пространственной дифференцируемости для сопряженных расчетных ячеек в оконечностях поворачивающегося корпуса корабля. Для достижения необходимой гладкости пространственных аппроксимаций в качестве внешнего возмущения задействуются только три групповые структуры с заданными периодами волн, для которых в вычислительном эксперименте не должно происходить самопроизвольного повышения частоты, в то время как доплеровские эффекты при отражении волн от подвижного корпуса корабля могут согласоваться простым уменьшением допустимых скоростей поворота корабля с установлением меньшего расчётного шага во времени.

Сформулированные условия проведения вычислительного эксперимента трудно реализуемы для математических моделей на основе традиционных метацентрических теорий, также как и в случае интегрирования давлений воды по смоченным поверхностям судовой обшивки. Собственно такие выводы получались в ходе последовательной реализации вариантов прямого вычислительного эксперимента по традиционным методикам теории корабля, в результате чего вычислительные алгоритмы были сведены к исходным теоретическим предпосылкам с интегралами по объему корпуса и с однократным интегрированием по спрямленной поверхности действующей ватерлинии для учета влияния осредненного градиента наклона волновой поверхности.

2.3 О текущей реализации прямого вычислительного эксперимента

В вычислительном эксперименте представляется вполне естественным использование только трёх структур морского волнения (рис. 1): активного ветрового; свежей зыби от недавних ветров под циклоническими вихрями; и пологие или реликтовые волновые последовательности от далеких штормов или прибрежных волновых резонаторов. В гидрометархивах хранятся многолетние записи в срочных телеграммах судовых метеопостов из всех районов Мирового океана о таких волновых структурах.

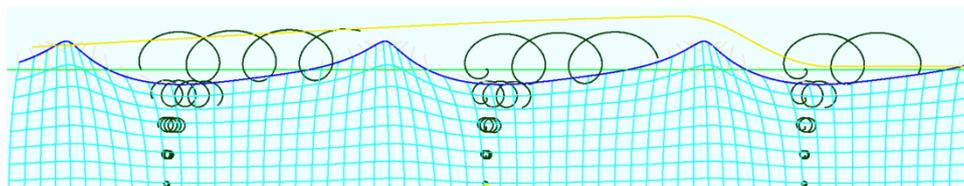


Рисунок 1. Профили трохойдальных волн с вертикальным смещением среднего уровня, с учётом действия ветрового напряжения на взволнованной поверхности моря. Сетка отмечает поверхности равных давлений под гребнями волн, циклоиды – траектории частиц жидкости.

Алгоритм разностной схемы волновых уравнений свободного распространения волн:

$$\begin{cases} {}_s\vec{V} += C_w \cdot \frac{\delta t}{\delta s} \cdot ({}_{s+1}\vec{\zeta} - {}_s\vec{\zeta}) \cdot \sigma \quad [\text{м/сек}] \quad \{s \in 0..ns-1\} \\ {}_s\vec{\zeta} += C_w \cdot \frac{\delta t}{\delta s} \cdot ({}_s\vec{V} - {}_{s-1}\vec{V}) / \sigma \quad [\text{м}] \quad \{s \in 1..ns-1\} \end{cases},$$

где: V – скорость и ζ – местоположение частиц на поверхности воды; $\sigma = 2\pi/\tau$ – частота на траекториях трохойдальных волн с периодом τ [сек]; δt – шаг во времени, δs – условный шаг и ns – размер сеточной области.

Движущаяся модель корабля может отдельно взаимодействовать с каждым из волновых полей, что гидродинамически корректно определяет силовое воздействие волн на корпус корабля (рис. 2). Результирующее волновое поле получается простым суммированием и служит лишь для визуализации хода вычислительного эксперимента.

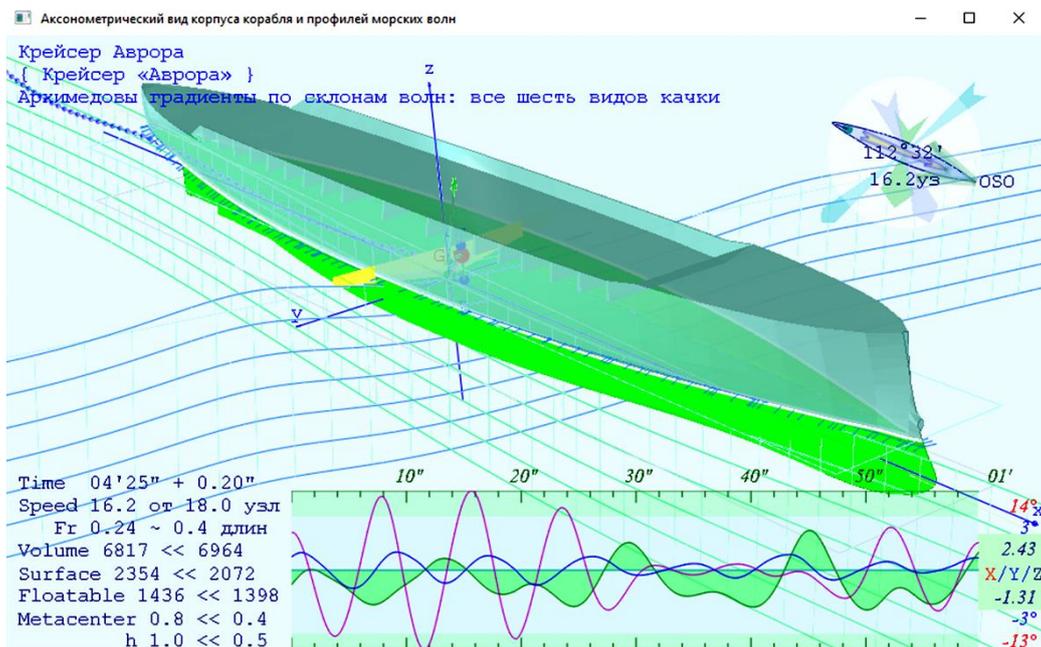


Рисунок 2 Графическое окно с характеристиками корпуса корабля. Справа вверху картушка с курсом корабля и стрелками характерных длин, высот и направления движения групповых структур волн. В нижней части экрана графики бортовой, килевой и вертикальной качки.

На каждом шаге вычислительного эксперимента заново вычисляются геометрические характеристики и гидродинамические параметры корпуса с учётом кинематики на взволнованной поверхности моря. На первом цикле вычислений волновое поле не создается, и результаты расчётов переписываются исходным числовым объектам для фиксации массовых, инерционных и гидростатических параметров корабля на тихой воде без качки.

Вычислительный эксперимент образуется последовательностью алгоритмов с векторными и тензорными величинами: $\vec{B} = \nu \vec{W} \cdot i\vec{V}$ – вектор архимедовых сил всплытия; $\vec{W} = \{0, 0, Volume\}$ – вертикальный вектор массы (объема) корпуса; $\vec{V} += g \cdot (\vec{B} + \vec{W}) \cdot \delta t / (Volume \cdot r)$ – скорость поступательных перемещений корпуса в корабельной системе координат. После применения коэффициентов демпфирования, привносящих влияние вязкости и присоединенных масс жидкости, такая вызванная скорость просто суммируется с текущей скоростью хода судна. $\vec{R} = r \cdot (\nu \vec{B} - Gravity)$ – плечо момента архимедовых сил

всплытия в морской системе координат; $\vec{\Omega}_+ = \{[g \cdot (\vec{R} \times \vec{B}) \cdot \vec{\mathcal{A}}] / r\} / inMass$ – обновлённый вектор угловой скорости качки в корабельной системе координат. Здесь также применяются коэффициенты демпфирования, а вектор архимедового всплытия дополняется инерционной составляющей от действующих ускорений на траектории движения центра масс корабля.

Важным элементом вычислительного эксперимента служит ограничение ускорения при выходе на заданную скорость хода и установка двух режимов циркуляции как: «руль на борт» и «полборта». Это позволяет моделировать возникновение крена на циркуляции и потерю хода на штормовом волнении, дельфинирование при захвате корпуса попутной волной и другие эффекты качки и ходкости по всем шести степеням свободного маневрирования судна.

Ускорению вычислений служат упорядоченные по шпациям числовые структуры для описания поверхностей судовой обшивки, что даёт возможность включения реентерабельных процедур для распараллеливания процесса всего вычислений. На каждом шаге эксперимента заново интерполируется действующая ватерлиния и ставятся бимсы для динамического разделения подводного и надводного объемов корпуса. По подводной части вычисляются измененные объемы, смещённые центры и новые моменты инерции массы корпуса, с использованием градиентов наклона поверхности волн определяется интегральный объём и осреднённое направление действия архимедовых сил всплытия. Метацентрические характеристики корпуса используются только для формального контроля динамики корабля в рамках традиционных представлений теории корабля, для чего дополнительно вычисляются площадь, положение центра и моменты инерции площади действующей ватерлинии.

3. Заключение

Важнейшей особенностью разрабатываемого программного обеспечения является полноценная трехмерная визуализация всех полей штормового волнения, также как и пространственного положения и траектории движения корпуса, его гидродинамических центров и метацентрических параметров мгновенной остойчивости. С использованием графических средств OpenGL для изменения прозрачности и выбора вариантов контурных прорисовок судовых обводов и надводной архитектуры корабля, создаётся особая экспериментальная среда инженерных изысканий в проектировании перспективного флота повышенной штормовой мореходности. Новый инструментарий полезен в практическом судовождении для оценки вариантов штормового маневрирования корабля, для выбора эффективного курса и скорости хода при оптимальной комфортности и безусловной безопасности реального штормового плавания.

Литература

- [1] Храмушин В. Н. Поисковые исследования штормовой мореходности корабля. История эволюционного становления корабельного дела, о единении морских инженерных наук и хорошей морской практики. Lambert Academic Publishing. 2018. 470 стр.
- [2] Degtyarev A, Gankevich I, Kulabukhova N, Khramushin V. (2020). Computational Model of Unsteady Hydromechanics of Large Amplitude Gerstner Waves. EPJ Web of Conferences. 226. 02009. 10.1051/epjconf/202022602009
- [3] Богданов А. В., Храмушин В. Н. База данных: «Vessel» – Проектные чертежи для анализа гидростатических характеристик, остойчивости и ходкости корабля. Роспатент. База данных СПбГУ № 2015621368 от 8 сентября 2015 г.