А.Э. Блищик, А.Е. Таранов
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СУДНА В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЯЕМОСТИ И КАЧКИ

Объект и цель научной работы. Приводятся результаты решения некоторых задач динамики судна с использованием методов вычислительной гидродинамики: самоходное движение танкера KVLCC2 и изменение положения контейнеровоза S175 под волновой нагрузкой. Целью работы является демонстрация уровня готовности технологии численного моделирования для данного класса задач.

Материалы и методы. Характеристики течения вязкой жидкости вокруг моделей судов находятся из решения методом контрольного объема нестационарных уравнений Рейнольдса, замкнутых моделью турбулентности. Моделирование двухфазного течения вода/воздух осуществляется с использованием метода Volume of Fluid (VOF). Выполняется решение системы уравнений динамики твердого тела, движущегося с 6 степенями свободы.

Основные результаты. Для задач входа судна в циркуляцию и качки судна на регулярном волнении при различных курсовых углах волны получено хорошее согласование результатов численного моделирования с экспериментальными данными. Проведенные работы показали, что современное состояние численных методов и суперкомпьютерной техники позволяет с достаточной для инженерных задач точностью прогнозировать характеристики динамики объектов морской техники.

Заключение. Современный уровень развития вычислительной техники и технологий численного моделирования позволяет сократить объем экспериментальных исследований, а в тех случаях, когда экспериментальные исследования по-прежнему необходимы, существенно их дополнить. Кроме того, численное моделирование может быть выполнено непосредственно для объекта натурных размеров, находящегося в натурных условиях с учетом реальных свойств среды.

Ключевые слова: численное моделирование, динамика судна, качка, управляемость, суперкомпьютер, Крыловский государственный научный центр.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Блищик А.Э., Таранов А.Е. Численное моделирование динамики судна в задачах управляемости и качки. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 2(384): 29–38.

УДК 629.5.017.2 DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-384-29-38

A. Blischik, A. Taranov
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

NUMERICAL SIMULATION OF SHIP DYNAMICS IN TERMS OF MANEUVRABILITY AND MOTIONS

Object and purpose of research. This paper gives CFD solution results to certain problems of ship dynamics: self-propelled movement of KVLCC2 tanker and change in S175 container ship position under wave load. The purpose of this work is to demonstrate the readiness level of numerical simulation technology for this class of problems.

Materials and methods. Parameters of viscous flow around ship models are found from the solution (as per control-volume method) of unsteady Reynolds equations closed by the turbulence model. Two-phase flow (water/air) is simulated as per Volume of Fluid (VOF) method. The system of dynamic equations of the moving solid-body is solved for 6 degrees of freedom.

Main results. Numerical simulation results have shown a good correlation with the test data for ship entrance to gyration and motions in regular waves at different wave heading angles. The work has shown that currently available numerical methods and supercomputers are capable of predicting dynamic parameters of marine objects with the accuracy sufficient for engineering purposes.

Conclusion. State-of-the-art computers and numerical simulation technologies can reduce the scope of tests, and when the tests are still necessary, even supplement them considerably. Besides, numerical simulation can be performed directly for a full-scale object in real conditions, taking into account real properties of its environment.

Key words: numerical simulation, ship dynamics, motions, maneuverability, supercomputer, KSRC.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Blischik A., Taranov A. Numerical simulation of ship dynamics in terms of maneuvrability and motions. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 2(384): 29–38 (in Russian).

UDC 629.5.017.2 DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-384-29-38

Введение
Introduction

Одной из важных характеристик судна является динамика его поведения при наличии внешних воздействий, изучаемая в таких разделах теории корабля, как управляемость и качка. Классификационные общества уделяют этому вопросу значительное внимание и имеют в своих правилах ряд обязательных требований по управляемости и качке судна. В первую очередь управляемость судна важна для безопасности плавания, особенно при маневрировании в портах. Нельзя забывать и об угрозе безопасности пассажиров или груза при невозможности достаточно быстро свернуть с курса и уйти от столкновения, а также при сильных ветро-волновых нагрузках. Кроме того, существует влияние характеристик маневренности и на экономическую эффективность судна. Все эти факторы в значительной мере стимулируют исследование характеристик динамики судна по всему миру.

Несмотря на то, что использование численных методов для определения динамики судна не приобрело широкой популярности из-за большой ресурсоемкости, развитие вычислительных мощностей позволяет обойти многие ограничения, которые ранее не позволяли в должной мере использовать численное моделирование. Данное направление является очень перспективным, т.к. в обозримом будущем поможет сократить время и стоимость исследований в данной сфере [1–6]. Тем не менее, прежде всего необходимо удостоверится в корректности получаемых результатов.

Т.к. понятие динамики судна включает в себя очень широкий класс задач, в данной работе были рассмотрены две наиболее популярные задачи данного типа:

- вход судна в циркуляцию;
- изменение положения судна на регулярном волнении при различных курсовых углах.

Для валидации результатов были использованы данные экспериментальных исследований. В конце работы делается вывод относительно корректности используемых численных методов.

Задача о входе судна в циркуляцию
Ship entrance to gyration

Постановка задачи

Рассматривается трехмерная прямоугольная расчетная область. Внутри области судно совершает циркуляционное движение. В качестве исследуемого объекта используется модель танкера KVLCC2 в масштабе 1:58 (рис. 1). Данная модель находится в открытом доступе (сайт SIMMAN [7]). Геометрические характеристики KVLCC2 в масштабе 1:58: L_{pp} – 5,51 м, ширина – 1 м, высота – 0,51 м, осадка – 0,35 м, масса – 1602 кг.

Длина расчетной области 30 L_{pp}, ширина 14 L_{pp}, высота 2,5 L_{pp}. Все граничные поверхности за исключением верхней являются твердыми стенками с условиями проскальзывания. Верхняя поверхность является условием выхода по давлению ($P = 0$). На все твердые стенки были наложены условия демпфирования для регулировки возможного отражения волн.

Рис. 1. Модель танкера KVLCC2
Fig. 1. Model of KVLCC2 tanker

Параметры сред

Одной из главных особенностей данной работы является учет свободной поверхности. Данная опция позволяет разрешать волновую картину вокруг судна, что дает возможность анализировать волновое сопротивление корпуса судна. Помимо этого, без моделирования свободной поверхности невозможно определить углы дифферента и крена, а также всплытие. Вследствие этого в задаче была использована многофазная постановка со следующими физическими параметрами:

- воздух: плотность – 1,1841 кг/м^3, динамическая вязкость – $1{,}85\cdot10^{-5}$ м^2/с;
- вода: плотность – 1000 кг/м^3, динамическая вязкость – 0,001114 м^2/с.

Сила тяжести была направлена положительно по оси Z и равнялась стандартным 9,81 м/с^2.

Математическая модель

Рассматривалась многофазная нестационарная задача о движении тела, имеющем 6 степеней свободы: движение по осям X, Y и Z, изменение углов дифферента, крена и рыскания. Движение и вращение тела определялось следующими уравнениями:

$$m\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{f}; \tag{1}$$

$$m\frac{d\vec{\omega}}{dt} + \vec{\omega}\times M\vec{\omega} = \vec{n}, \tag{2}$$

где m – масса тела; $\vec{v}$ – скорость тела с тремя компонентами (x, y, z); $\vec{f}$ – результирующая сила, действующая на тело; M – тензор момента инерции; $\vec{\omega}$ – угловая скорость тела; $\vec{n}$ – результирующий момент, действующий на тело.

Движение фазы (воды или воздуха) моделировалось с помощью системы уравнений Навье – Стокса осредненных по Рейнольдсу и замкнутой соответствующей моделью турбулентности. Система уравнений Навье – Стокса осредненных по Рейнольдсу:

$$\begin{cases} \nabla\cdot\bar{\bar{V}} = 0 \\ \dfrac{\partial\bar{\bar{V}}}{\partial t} + \nabla\cdot(\bar{\bar{V}}\bar{\bar{V}}) = -\dfrac{1}{\rho}\nabla\bar{p} + \dfrac{1}{\rho}\nabla(\tau_m + \tau) + \bar{\bar{g}} \end{cases}, \tag{3}$$

где $\bar{\bar{V}}$ – осредненная скорость движения фазы с тремя компонентами по x, y, z, $\bar{p}$ – осредненное давление, v_t – турбулентная вязкость. Для нахождения турбулентной вязкости система (4) замыкается моделью турбулентности. В данной работе выбрана модель k-ω SST Ментора [8] ввиду ее большей универсальности:

$$\begin{cases} \rho\dfrac{Dk}{Dt} = \nabla\cdot\left((\mu+\sigma_k\mu_t)\nabla k\right) + P_k - \beta^*\rho\omega k; \\ \rho\dfrac{D\omega}{Dt} = \nabla\cdot\left((\mu+\sigma_\omega\mu_t)\nabla\omega\right) + \gamma\dfrac{\rho}{\mu_t}P_k - \beta\rho\omega^2 + \\ +(1-F_1)D_{kw}; \end{cases} \tag{4}$$

где k – кинетическая энергия турбулентности, ω – модифицированная скорость диссипации.

Для вычисления расположения свободной поверхности использовался метод Volume of fluid [9]. В данном методе решается уравнение сохранения относительно переменной C, принимающей значения от 0 до 1 и характеризующей количество жидкой фазы в ячейке:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{V}\cdot\nabla C = 0. \tag{5}$$

Расчетная сетка и численные параметры

Построение сетки, проведение расчетов и визуализация результатов были выполнены в программе STAR-CCM+. Необходимо отметить, что при разбиении пространства на контрольные объемы был использован метод вложенных сеток (overset-метод). Суть его заключается в том, что сетка делится на два блока: внешний и внутренний (overset-блок). Внешний блок представляет собой обычную

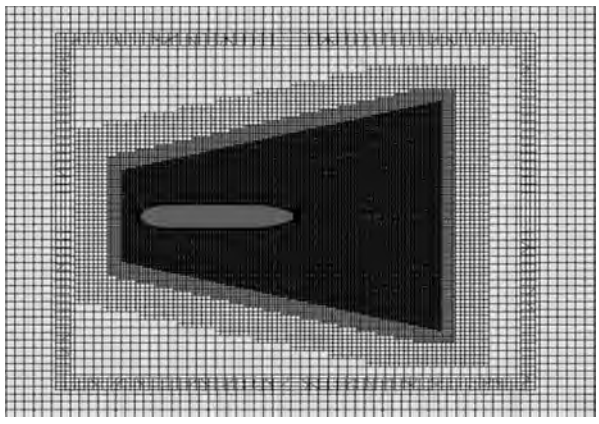


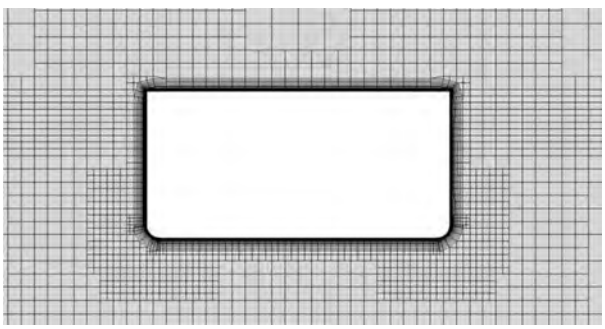
Рис. 2. Судно внутри overset-блока
Fig. 2. Ship inside the overset block

гексаэдральную сетку, а overset является небольшим блоком, внутри которого и находится объект совершающий движение. Этот overset-блок двигается вместе с телом внутри внешнего блока. Сетка внутри overset-блока представлена на рис. 2.

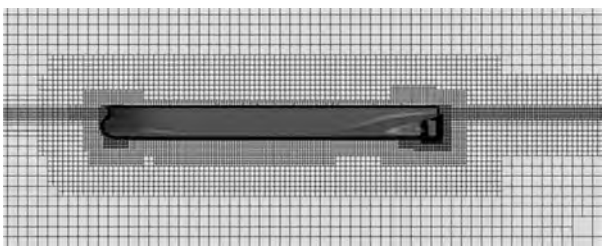
Тип сетки – гексоэдральная. Для разрешения пограничного слоя по корпусу судна было создано дополнительное сгущение расчетной сетки к корпусу судна. Т.к. рассматривается модель судна KVLCC2, а не объект натурных размеров, была использована модель турбулентности в низкорейнольдсовой постановке, требующая безразмерного расстояния центра первой ячейки до ближайшей стенки $y^+ < 1$.

Количество ячеек в расчетной сетке – около 7 млн. Локальные сгущения сетки сделаны в области руля, на волновой поверхности, а также вблизи поверхности корпуса судна. Помимо этого, сетка была измельчена по всей расчетной области в окрестности свободной поверхности для более качественного разрешения границы фаз (рис. 3).

Для того, чтобы судно совершало движение, необходим источник силы. В большинстве случаев на грузовых судах такую роль выполняет гребной винт. Однако наличие в задаче работающего гребного винта требует значительных сеточных затрат и не всегда оправдано, особенно если целью является анализ траектории движения. В таком случае рациональнее использовать технологию виртуального диска, что и было проделано.



а)



б)

Рис. 3. Расчетная сетка в различных сечениях:
а) плоскость мидель-шпангоута;
б) диаметральная плоскость

Fig. 3. Calculation mesh in different sections:
a) midstation plane; *b*) center plane

Виртуальный диск – это круг, математически моделирующий работу гребного винта, передавая судну упор и момент. Являясь, по сути, разрывом и находясь на границе между двумя ячейками, он изменяет параметры движения жидкости, проходящей через него. В частности, существенно увеличивает угловую скорость для закрутки потока, как и настоящий гребной винт. Для наиболее правдоподобного моделирования гребного винта необходимо знать его кривые действия, а именно зависимость коэффициента упора, коэффициента момента и КПД от поступи. Кривые действия гребного винта KVLCC2 были загружены с сайта SIMMAN workshop [7]. Влияние криволинейности движения на коэффициенты взаимодействия не рассматривалось.

Начинать движение сразу с переложенным рулем неверно, т.к. в момент перекладки руля судно должно двигаться с соответствующей эксперименту скоростью, и волновая картина вокруг корпуса судна должна быть установившейся. Следовательно, необходимо рассмотреть два основных режима движения: на прямом ходу (разгон) и в режиме циркуляции.

Проблема перекладки руля и перехода между этими двумя режимами была решена следующим образом. После выхода судна на квазистационарный режим производилась перекладка руля, затем вся геометрия и локальньные сгущения сетки перемещалась из начальной системы координат в систему координат, связанную с телом. Это перемещение необходимо, чтобы решение продолжалось с момента остановки решения, а не с момента инициализации решения. Далее перестраивалась сетка, происходила экстраполяция решения, считывалась новая геометрия и расчет продолжался уже с переложенным рулем, соответственно, судно начинало двигаться в режиме циркуляции. Руль в переложенном и в изначальном положении представлен на рис. 4. Переложение руля происходило мгновенно.

Все расчеты были выполнены со вторым порядком дискретизации по пространству (противопоточная схема второго порядка – Second-Order Upwind) и первым порядком по времени (левая конечно-разностная схема). Используемый метод решения – SIMPLE. Шаг по времени $\Delta t = 0{,}005$ с.

Результаты

Экспериментальная скорость при начале поворота $U_{эксп}$ = 1,047 м/с. Для того, чтобы ее достичь, виртуальному диску были заданы коэффициент упора и момент винта KVLCC2, соответствующие максимальному значению коэффициента полезного действия: K_Q = 0,01344, K_T = 0,0951, η = 0,6757. Начальная скорость при этом равнялась 1,047 м/с для сокращения времени разгона.

Для автоматизации разгона была написана программа, регулирующая частоту вращения виртуального диска на основе имеющихся данных. При увеличении скорости судна частота вращения уменьшалась, а при уменьшении скорости судна увеличивалась. Результат разгона судна представлен на рис. 4.

Рассмотрев рис. 4, можно отметить, что судно достигло необходимой скорости $U_{эксп}$ = 1,047 м/с с точностью в 2 %, что является хорошим результатом Таким образом, достигнутая экспериментальная скорость позволяет сделать вывод о достаточном разгоне судна, что дает нам право приступить непосредственно к движению на циркуляции. Перекладка руля осуществлялась после разгона судна, на 25 секунде расчета и при достижении им скорости, равной 1,047 м/с. Угол перекладки равнялся 35 градусам [10]. В расчете было активны три степени свободы – движение по осям *X*, *Y* и угол рысканья.

Основным параметром, характеризующим движение на циркуляции, является тактический диаметр (*TD*) – расстояние между диаметральной плоскостью судна в начале поворота и ее положением после изменения первоначального судна на 180° (рис. 5) [11].

Однако, как уже было сказано выше, сразу начинать движение на циркуляции неверно. Прежде всего необходимо, чтобы судно разогналось до соответствующей эксперименту скорости [10], иначе тактический диаметр будет отличаться от экспериментального. Разгон проводился при неизмененном положении руля, т.е. на прямом ходу. По результатам численного моделирования тактический диаметр составляет $TD = 3{,}03\ L_{pp}$ Экспериментальное значение *TD*, согласно [10], равно $3{,}1\ L_{pp}$. Таким образом, отличие значения, полученного с помощью численного моделирования, от аналогичного экспериментального значения составляет Δ = 2,3 %, что является хорошим результатом. По рис. 6 можно заметить, что судно не сразу выходит на устойчивую циркуляцию, а делает это только со второго круга.

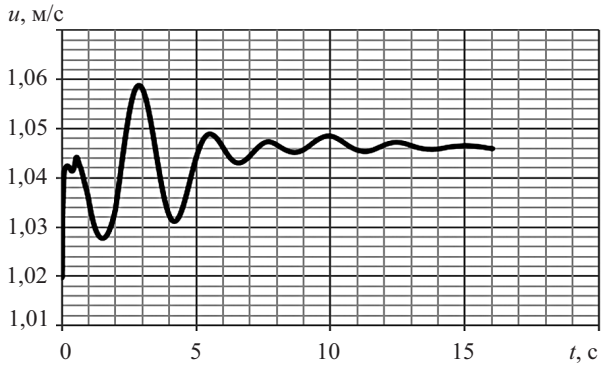


Рис. 4. Зависимость скорости судна от времени
Fig. 4. Ship speed versus time

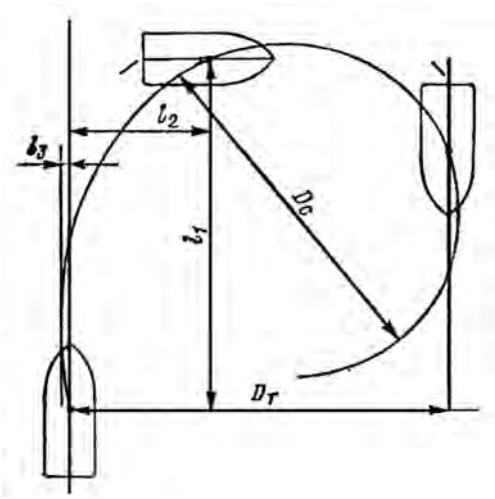


Рис. 5. Определение тактического диаметра судна
Fig. 5. Determination of ship's tactical diameter

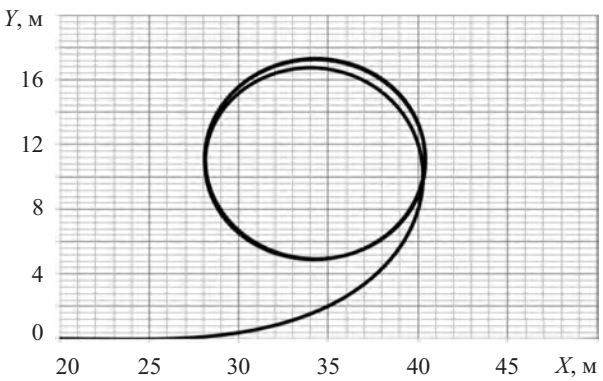


Рис. 6. Траектория судна. Три степени свободы
Fig. 6. Ship trajectory. 3DOF

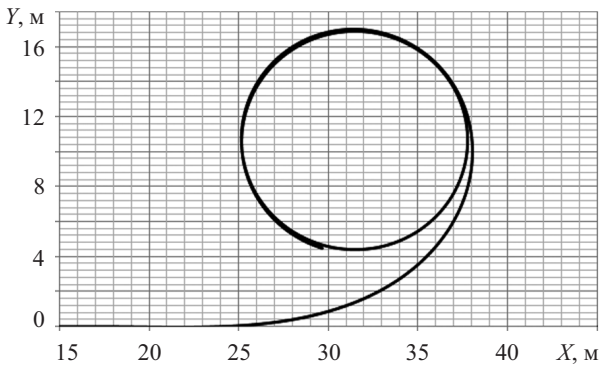


Рис. 7. Траектория движения. Шесть степеней свободы

Fig. 7. Ship trajectory. 6DOF

При проведении аналогичного расчета со всеми шестью степенями свободы результаты уточняются. $TD = 3{,}078\ L_{pp}$, что меньше экспериментального значения на $\Delta = 0{,}7$ %. Таким образом, введение всех степеней свободы уточняет расчет на $\Delta = 1{,}6$ %. Помимо этого, при использовании шести степеней свободы судно выходит на устойчивую циркуляцию сразу с первого круга (рис. 7).

Для того, чтобы подтвердить сеточную независимость полученного решения, необходимо провести исследование на сеточную сходимость. Т.к. $y^+ < 0{,}4$, что считается более чем достаточным для корректного разрешения трения на корпусе судна, то было проведено только изменение разрешения в области свободной поверхности. Для того, чтобы это проверить, локальное сгущение свободной поверхности было уменьшено в два раза.

В результате тактический диаметр при использовании измельченной сетки получился равным $TD = 3{,}09\ L_{pp}$. Таким образом, отличие от аналогичного результата на исходной сетке составляет $\Delta = 0{,}3$ %. Учитывая увеличение количества ячеек на 2 млн (на 30 %), такое измельчение нерационально, и можно говорить о достижении сеточной сходимости по волновой поверхности.

Качка судна на регулярном волнении

Ship motions in regular waves

Постановка задачи

Постановка задачи о динамике судна на регулярном волнении во многом аналогична постановке задачи о движении на циркуляции. Рассматривается трехмерная прямоугольная расчетная область. Внутри области находится судно, на которое набегают регулярные волны. В качестве исследуемого объекта используется модель контейнеровоза S175 [12, 13] в масштабе 1:50 (рис. 8). Геометрические характеристики S175 в масштабе 1:50: L_{pp} – 3,6 м, ширина – 0,51 м, высота – 0,33 м, осадка – 0,19 м, масса – 196 кг.

Длина расчетной области составляет 8 L_{pp}, ширина – 6,5 L_{pp}, высота – 1,4 L_{pp}. Все граничные поверхности за исключением левой, верхней и правой верхней являются твердыми стенками с условиями проскальзывания. Левая поверхность является условием входа по скорости, при этом скорость потока на входе равна нулю, а сам вход необходим только для задания волновой картины. Верхняя и правая поверхности являются условием выхода по давлению ($P = 0$). На все твердые стенки были наложены условия демпфирования для устранения возможного отражения волн.

Математическая модель и параметры сред

Математическая модель и параметры сред аналогичны соответствующим пунктам предыдущей задачи, за исключением того, что у S175, в отличие от KVLCC2, были активны только три степени свободы – всплытие и углы крена и дифферента.

Расчетная сетка и численные параметры

При построении расчетной сетки применялся overset метод аналогично описанному ранее. При этом размер самого блока меньше, чем в задаче о циркуляции, т.к. судно не совершает движения, и область

Рис. 8. Модель танкера S175

Fig. 8. Model of S175 tanker

сгущения сетки на свободной поверхности можно вынести за пределы overset-блока. Тип сетки – гексоэдральная, безразмерное расстояние от стенки до центра первой ячейки $y^+ \approx 0{,}2$. Размерность сетки – около 8,3 млн ячеек. Локальные сгущения сетки выполнены к корпусу судна, а также по длине и высоте волны, для качественного разрешения волновой картины. Общая картина сетки представлена на рис. 9.

Волнение моделировалось с помощью аппроксимации первого порядка волновой теории Стокса и носило регулярный периодический синусоидальный характер.

Уравнение для горизонтальной скорости:

$$v_h = aw\cos(\vec{K}\cdot\vec{X} - wt)e^{Kz}. \quad (6)$$

Уравнение для вертикальной скорости:

$$v_v = aw\sin(\vec{K}\cdot\vec{X} - wt)e^{Kz}. \quad (7)$$

Уравнение для высоты поверхности:

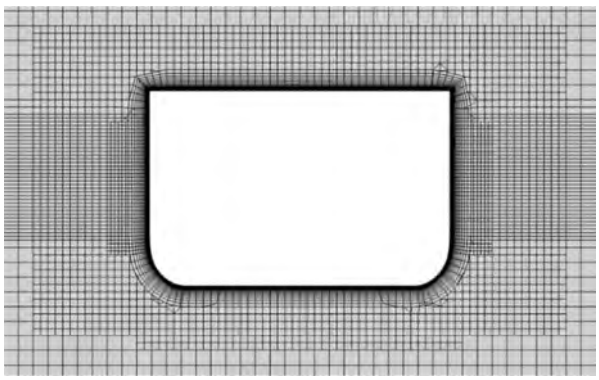
$$\mu = a\cos(\vec{K}\cdot\vec{X} - wt), \quad (8)$$

где a – амплитуда волны; w – частота волны; $\vec{K}$ – волновой вектор; K – модуль волнового вектора, z – расстояние от уровня свободной поверхности. Точка начала генерации волн находилась за входным условием и за пределами расчетной области. В качестве входных параметров использовались длина и амплитуда волны. В работе было рассмотрено несколько вариантов курсового волнения – 90 и 135 градусов по отношению к судну.

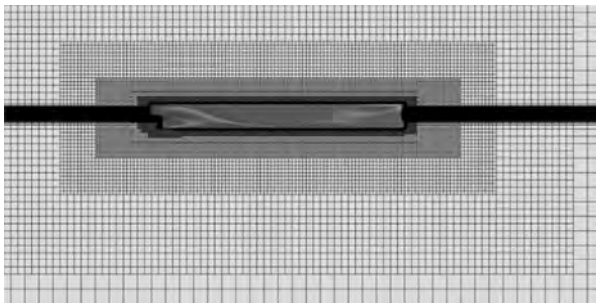
Все расчеты были выполнены со вторым порядком дискретизации по пространству (противопоточная схема второго порядка – Second-Order Upwind) и времени (левая конечно-разностная схема). Используемый метод решения – SIMPLE. Шаг по времени $\Delta t = 0{,}005$ с.

Результаты

В качестве результатов были получены зависимости всплытия, углов дифферента и крена судна от времени. Полученные графики осреднялись на участке квазистационарного изменения положения судна, и в результате было получено по одному значению для каждого режима. Осреднение происходило с помощью собственной программы, написанной на языке FORTRAN. Для сравнения с аналогичными экспериментальными данными полученные значения были обезразмерены. Обезразмеривание углов крена и дифферента проводилось на угол волнового склона, обезразмеривание всплытия – на



а)



б)

Рис. 9. Расчетная сетка в различных сечениях:
а) плоскость мидель-шпангоута;
б) диаметральная плоскость

Fig. 9. Calculation mesh in different sections:
a) midstation plane; *b*) center plane

амплитуду волны. Физический эксперимент был проведен в мореходном бассейне Крыловского государственного научного центра в 2012 г. под руководством Ю.С. Кайтанова по рекомендованной международным комитетом опытовых бассейнов процедуре [12]. Графически сравнение представлено на рис. 10–11.

Как видно из рис. 10, полученные результаты угла крена и всплытия получились очень близкими к экспериментальным. Наибольшее различие наблюдается только в последней точке с частотой $\omega_м = 0{,}91$ рад/с. Сильное различие угла дифферента объясняется крайне малыми полученными значениями (десятые доли градуса), при которых сопоставление результатов затруднительно.

Анализ рис. 11 показывает, что при курсовом волнении 135 градусов результаты, полученные с помощью численного моделирования, хорошо совпадают с экспериментальными результатами в случае угла крена и всплытия. Различие между

углами дифферента не так сильно выражено, как в варианте с углом волнения 90 градусов – за счет того, что при курсовом волнении 135 градусов угол дифферента принимает большие значения.

Выполнение сеточной сходимости для постановки задачи вызывало некоторые трудности ввиду большой ресурсоемкости и длительности времени расчета. Вследствие этого исследование сеточной независимости решения было проведено в упрощенной постановке. В ней отсутствовало регулярное волнение и было изменено начально положение судна – угол крена составлял 20 градусов. Таким

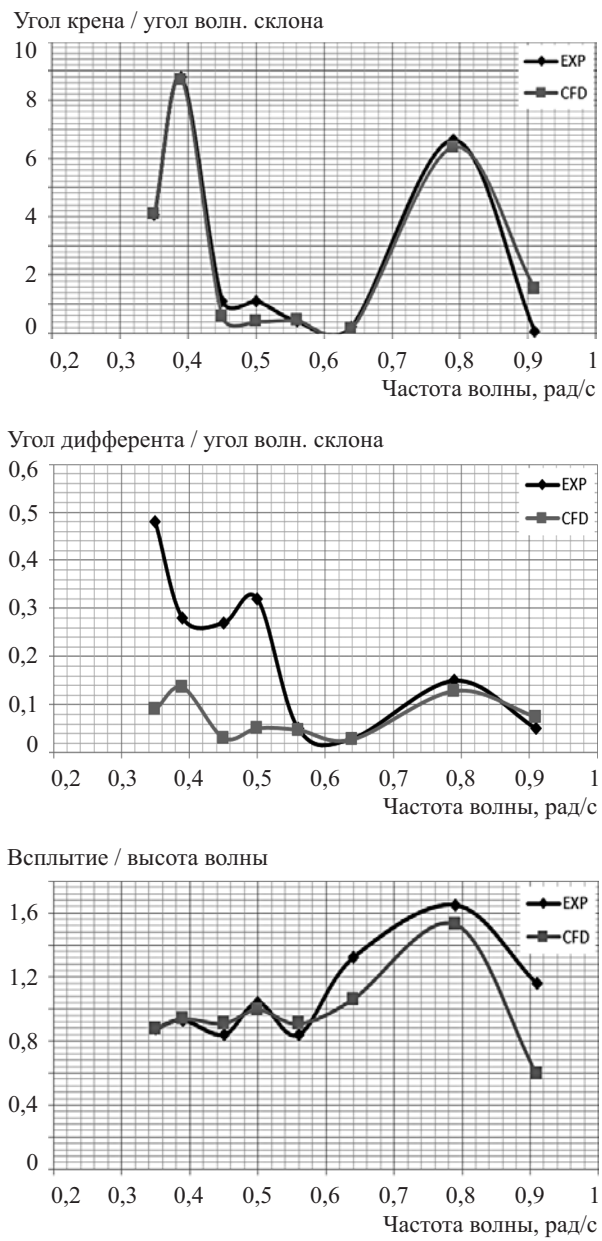


Рис. 10. Сравнение экспериментальных и численных результатов при курсовом волнении в 90 градусов

Fig. 10. Test results vs numerical data. Wave heading angle 90°

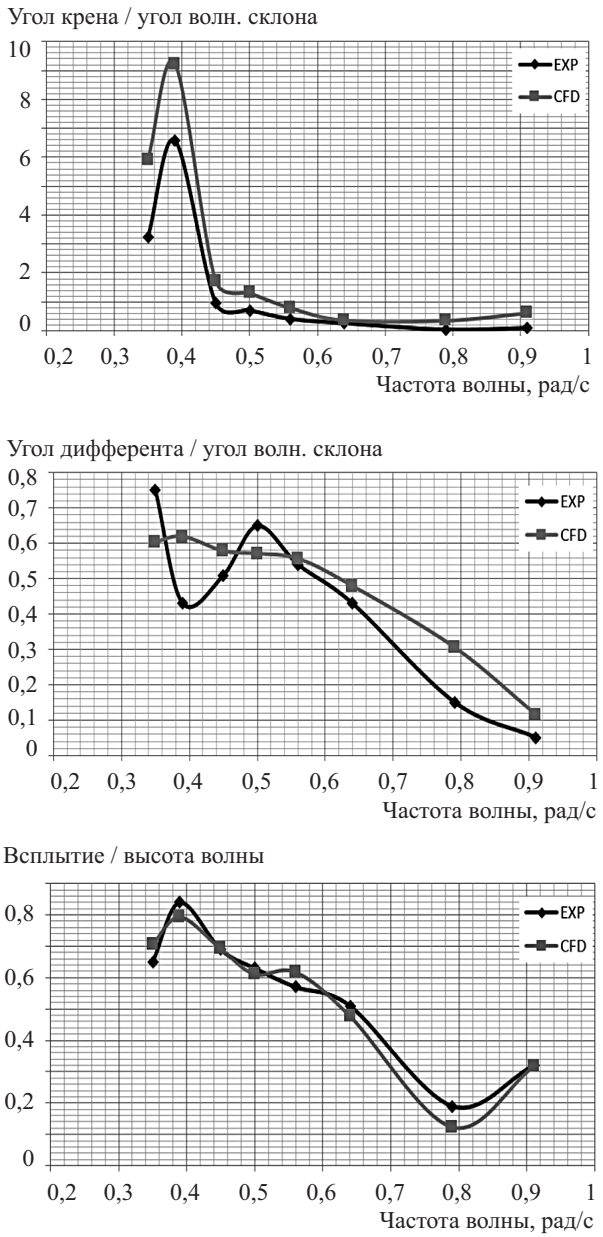


Рис. 11. Сравнение экспериментальных и численных результатов при курсовом волнении в 135 градусов

Fig. 11. Test results vs numerical data. Wave heading angle 135°

образом, после начала расчета судно начинало совершать колебания, период которых и служил исследуемой величиной. Выполнялось сравнение с аналогичными экспериментальными данными. В расчетной сетке было проведено измельчение и огрубление области вокруг судна. Изменение параметра y^+ не проводилось, т.к. изначально данная величина была равна $y^+ = 0{,}2$, что является достаточным для корректного разрешения трения.

Согласно приведенной таблице, сетки с размером 1,3 и 4 млн ячеек показывают недостаточно хорошие результаты – разница с экспериментом составляет 4,2 % и 5,48 % соответственно. Сетки с размером 8,3 и 15,5 млн показывают значительно лучший результат, но использование сетки в 15,5 млн резко повышает требования по ресурсам. Таким образом, сетка в 8,3 млн является наиболее оптимальной по соотношению результат/ресурсы.

Таблица. Результаты исследования сеточной независимости

Table. Investigation results for mesh independence

Размерность сетки, млн ячеек	T_{CFD}, с	$T_{ЭКСП}$, с	Δ, %
1,3	15,69	16,6	5,48
4,0	15,90		4,22
8,3	15,98		3,43
15,5	16,15		2,71

Заключение

Conclusion

В работе были рассмотрены две задачи: вход судна в циркуляцию и качка судна на регулярном волнении при различных курсовых углах волны. Задача о входе в циркуляцию потребовала разделения на две части: разгон и сам поворот. Это усложнило расчет, но позволило достичь наиболее корректного воспроизведения реальных условий. Полученные значения тактического диаметра показывают очень хорошее совпадение с экспериментальным результатом – погрешность около 0,7 %. Требуемые для одного расчета вычислительные ресурсы составляют около 15 000 ядро-часов. Сокращение времени расчета возможно за счет уменьшения расчетной сетки, однако это ведет к уменьшению точности расчета.

Задача о динамике судна на волнении потребовала тщательного разрешения волновой картины, чтобы полученные результаты были удовлетворительными. Графики угла крена и всплытия лежат близко к экспериментальным величинам, а различия между значениями угла дифферента объясняются чрезвычайно малыми значениями самого угла дифферента. Основной сложностью является довольно длительное время расчета. Требуемые для одного расчета вычислительные ресурсы составляют около 110 000 ядро-часов.

Можно сделать вывод о целесообразности применения численных методов для данного типа задач. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными и позволяют решать сложные задачи динамики объектов морской техники произвольной формы в различных внешних условиях с достаточной для инженерных расчетов точностью.

Библиографический список

References

1. *Kvale J.M.* Revised simulation model for a Very Large Crude Carrier (VLCC). Master thesis. Norwegian university of science and technology, 2014.
2. *Stern F., Agdrup K., Kim S.Y., Hochbaum A.C., Rhee K.P., Quadvlieg F., Perdon P., Hino T., Broglia R., Gorski J.* Experience from SIMMAN 2008 – The first workshop on verification and validation of ship maneuvering simulation methods // Journal of Ship Research. 2011; 2(55): 135–47.
3. *Tezdogan T., Demirel Y.K., Kellett P., Khorasanchi M., Incecik A., Turan O.* Full-scale unsteady RANS CFD simulations of ship behaviour and performance in head seas due to slow steaming // Ocean Engineering. 2015; 97: 186–206.
4. *Kim S.P.* CFD as a seakeeping tool for vessel design // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2011; 3: 65–71.
5. *Simonsen C.D., Otzen J.F., Joncquez S., Stern F.* EFD and CFD for KCS heaving and pitching in regular head waves // Journal of Marine Science and Technology. 2013; 18: 435–59.
6. *Filip G.P., Xu W., Maki K.J.* Technical Report 355, 2017.
7. MOERI Tanker KVLCC2. [Электрон. ресурс] / Сайт Workshop on verification and validation of vessel maneuvering simulation methods. URL: http://www.simman2008.dk/KVLCC/KVLCC2/kvlcc2_geometry.html (дата обращения 19.03.2018).
8. *Menter F.R.* Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. 1994; 32: 1598–605.

9. *Hirt C.W., Nichols B.D.* Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // Journal of Computational Physics. 1981; 39(1): 201–25.
10. *Toxopeus S.L., Lee S.W.* Comparison of manoeuvring simulation programs for SIMMAN test cases // SIMMAN 2008 Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods. Denmark, 2008. P. 56–61.
11. Справочник по теории корабля. Т. 3. Л.: Судостроение, 1985. [Ship Theory. Reference book. In 3 vol. Vol. 1. Leningrad: Sudostroyeniye, 1985. (in Russian)].
12. Report of the Seakeeping Committee // Proc. 15th International Towing Tank Conference (ITTC). The Hauge, Netherlands. September, 1978. P. 55–70.
13. Report of the seakeeping committee, S-175 comparative model experiments // Proc. 18th International Towing Tank Conference (ITTC). Vol. 1. Kobe, Japan. October, 1987. P. 415–427.

Сведения об авторах

Таранов Андрей Евгеньевич, начальник Суперкомпьютерного центра математического моделирования ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: 8 (812) 748-63-19. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Блищик Артем Эдуардович, инженер ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: 8 (812) 748-63-19. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

About the authors

Taranov, Andrey Ye., Head of High-Performance Computer Centre, KSRC. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 748-63-19. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Blishchik, Artem E., Engineer, KSRC. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 748-63-19. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Поступила / Received: 22.05.18
Принята в печать / Accepted: 06.06.18