

Параллельные расчеты стратифицированных течений с использованием Web-лаборатории механики сплошных сред

Н.Ф. Димитриева, Я.В. Загуменный

Институт гидромеханики НАН Украины, ул. Желябова 8/4, Киев

dimitrieva@list.ru

Аннотация. *Представлен авторский опыт работы в Web-лаборатории механики сплошных сред, созданной на базе технологической платформы UniHUB, по численному моделированию и высокопроизводительным расчетам задач механики неоднородных жидкостей на основе свободных прикладных пакетов OpenFOAM, SALOME и ParaView. Обсуждаются вопросы построения высокопроизводительных расчетных сеток, использования встроенных и расширенных утилит и функций пакета OpenFOAM с целью постановки сложных граничных условий и разработки собственных решателей с применением объектно-ориентированного языка программирования C++. Уделяется внимание особенностям проведения расчетов в параллельном режиме на вычислительном кластере МСЦ РАН, обработки, передачи и визуализации расчетных данных. Демонстрируются рассчитанные картины течений непрерывно стратифицированной жидкости около непроницаемых препятствий – пластины, клина, диска и цилиндра. Непроницаемое неподвижное препятствие, помещенное в толщу неравновесной стратифицированной среды нарушает однородность фонового диффузионного потока стратифицирующей компоненты и приводит к формированию сложной вихревой системы медленных течений, которые носят название “индуцированных диффузией на топографии”. При движении пластины в стратифицированной жидкости формируются поля опережающих и присоединенных волн, а также квазистационарные высокоградиентные прослойки, разделяющие различные типы возмущений. Сравнение данных численного и лабораторного моделирования показывает хорошее согласование картин стратифицированных течений около неподвижных и движущихся непроницаемых препятствий.*

Ключевые слова

Кластерные системы, численное моделирование, открытые вычислительные пакеты, стратифицированные течения.

1 Введение

На сегодняшний день кластерные вычислительные установки приобретают все большую популярность, поскольку многие вычислительные задачи, счет которых ранее занимал недели и месяцы, а то вовсе был невозможен из-за малых ресурсов персональных компьютеров, теперь выполняется на вычислительных кластерах за приемлемое время.

Интенсивное развитие компьютерных технологий позволило существенно продвинуться в решении таких практически ценных задач, как прогнозирование катастроф волновой природы (цунами, наводнения, волны экстремальной высоты), наносящих наиболее ощутимый экономический ущерб и сопровождающихся человеческими жертвами, развитие технологий мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды и предотвращения ее загрязнения, управление аэродинамическим качеством крыловых профилей или иных аэродинамических компоновок с целью экономичного расходования энергоресурсов.

С появлением кластерных вычислительных установок были реализованы более точные методы построения решений и высокопроизводительные численные модели, в которых все большее внимание уделяется изучению влияния эффектов нелинейности, стратификации, вращения, диффузии, теплопроводности, как по отдельности, так и в общей постановке на основе фундаментальной системы уравнений механики неоднородных жидкостей. Тонкоструктурные компоненты течений, обусловленные воздействием перечисленных факторов, взаимодействуют между собой и порождают новые мелкомасштабные высокоградиентные элементы, которые оказывают заметное влияние на формирование структуры и динамики течений неоднородных жидкостей. Условия адекватности моделирования всех как крупно-, так и мелкомасштабных элементов течения в рамках

единого описания требуют высокого пространственно-временного разрешения задачи и привлечения численных схем высокого порядка точности. Данные обстоятельства затрудняют проведение численного моделирования, предъявляя высокие требования к быстродействию и объему памяти компьютера, и в большинстве случаев вынуждают программиста прибегать к использованию параллельных вычислений с целью существенного сокращения времени расчетов [1, 2].

Целью данной работы является развитие методики высокоразрешающего численного моделирования и высокопроизводительных расчетов течений непрерывно стратифицированной жидкости около препятствий выбранной формы в физически достижимом диапазоне определяющих параметров с учетом переноса вещества, как стратифицирующего компонента, так и визуализирующей примеси [3, 4]. Расчеты проводятся с использованием Web-лаборатории механики сплошных сред на базе виртуальной вычислительной платформы UniHUB, предоставляющей прямой доступ к вычислительным ресурсам кластерных систем и предлагающей широкий выбор вычислительных инструментов для численного моделирования.

2 Постановка задачи

В качестве расчетного примера физически обоснованной задачи, реализуемой численно с использованием виртуальной технологической платформы UniHUB, рассматривается задача установления течения непрерывно стратифицированной жидкости, как на неподвижном препятствии, так и около движущегося вдоль прямолинейной траектории. Математическое моделирование проводится на основе фундаментальной системы дифференциальных уравнений механики неоднородных многокомпонентных жидкостей [5]. Уравнения механики несжимаемой линейно стратифицированной жидкости, невозмущенное распределение плотности $\rho_0(z)$ которой задается профилем солености $S_0(z)$, где ось Oz направлена вертикально вверх, $\Lambda = (d \ln \rho_0 / dz)^{-1}$ – масштаб, $N = 2\pi/T_b = \sqrt{g/\Lambda}$ – частота и T_b – период плавучести, \mathbf{g} – ускорение свободного падения, включают уравнения состояния $\rho(S(z))$, неразрывности, Навье-Стокса в приближении Буссинеска, диффузии стратифицирующей компоненты и визуализирующей примеси:

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_{00} (\exp(-z/\Lambda) + s + s_0), \quad \operatorname{div} \mathbf{v} = 0, \\ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} &= -\frac{1}{\rho_{00}} \nabla P + \nu \Delta \mathbf{v} - (s + s_0) \mathbf{g}, \\ \frac{\partial s}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla s &= \kappa_s \Delta s + \frac{v_z}{\Lambda}, \quad \frac{\partial s_0}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla s_0 = \kappa_{s_0} \Delta s_0. \end{aligned} \quad (2.1)$$

Здесь s – возмущение солености (стратифицирующего компонента), включающее коэффициент солевого сжатия, s_0 – концентрация визуализирующей примеси, $\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z)$ – индуцированная скорость, P – давление за вычетом гидростатического, ν , κ_s и κ_{s_0} – коэффициенты кинематической вязкости, диффузии соли и пассивной примеси, соответственно, t – время, ∇ и Δ – операторы Гамильтона и Лапласа.

Физически обоснованные начальные условия и граничные условия задачи (прилипания для скорости и непротекания для вещества и затухания всех возмущений на бесконечности) имеют вид

$$\mathbf{v}, s|_{t \leq 0} = 0, \quad v_x|_{\Sigma} = v_z|_{\Sigma} = 0, \quad \left[\frac{\partial s}{\partial \mathbf{n}} \right]_{\Sigma} = \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial z}{\partial \mathbf{n}}, \quad [s_0]_{\Sigma_0} = c_0, \quad \mathbf{v}, s, s_0|_{x, z \rightarrow \infty} = 0, \quad (2.2)$$

где \mathbf{n} – внешняя нормаль к поверхности препятствия Σ . При рассмотрении задачи обтекания препятствия потоком стратифицированной жидкости на достаточно большом расстоянии от обтекаемого препятствия задается скорость невозмущенного потока $v_x|_{x, z \rightarrow \infty} = U_0$, $v_z|_{x, z \rightarrow \infty} = 0$.

Система (2.1) с начальными и граничными условиями (2.2) характеризуется большим числом собственных масштабов: длины (плавучести Λ , характерного размера препятствия L , скоростного $\delta_N^v = \sqrt{\nu/N}$ и диффузионного $\delta_N^{\kappa_s} = \sqrt{\kappa_s/N}$ микромасштабов); скорости ($U_N^v = \sqrt{\nu N}$, $U_N^{\kappa_s} = \sqrt{\kappa_s N}$) и времени $t = T_b$. Существенные различия в значениях масштабов длины указывают на сложность внутренней структуры даже такого медленного течения, которое порождается малыми силами плавучести, возникающими вследствие неоднородности молекулярного потока стратифицирующего компонента. Условия адекватного разрешения мелкомасштабных элементов течения, связанных с эффектами стратификации и диффузии, накладывает существенные ограничения на минимальный шаг по пространству, что существенно замедляет скорость

численных расчетов и вынуждает программиста прибегать к помощи высокопроизводительных вычислительных систем.

3 Численное решение задачи

Численное моделирование проводится на базе виртуальной вычислительной лаборатории UniHUB (www.unihub.ru), ориентированной на повышение эффективности процессов разработки, внедрения и моделирования вычислительных задач. Технологическая платформа UniHUB предоставляет прямой доступ на кластер Института системного программирования РАН (ИСП РАН) и вычислительные сегменты программы “Университетский кластер” Межведомственного Суперкомпьютерного Центра РАН (МСЦ РАН). Вычислительный сегмент состоит из 64 вычислительных узлов, объединенных высокопроизводительной сетью Infiniband и включающих в себя по 2 процессора Intel® Xeon® CPU E5450 @ 3.00GHz, 8 GB RAM, 100 GB SATA HDD. Кластер работает под управлением ОС Linux CentOS и системы управления кластера OSCAR с использованием системы пакетной обработки TORQUE и планировщика ресурсов MAUI для запуска вычислительных задач. Для проведения научно-исследовательской работы технологическая платформа UniHUB предлагает ряд приложений для численного моделирования задач механики жидкостей и деформируемых твердых тел, включая открытую интегрируемую платформу для пре- и постпроцессинга – SALOME (www.salome-platform.org), свободно распространяемый инструментальный вычислительный гидродинамики для операций с скалярными, векторными и тензорными полями – OpenFOAM (www.openfoam.com) и приложение с открытым исходным кодом для мультиплатформенного анализа и визуализации данных – ParaView (www.paraview.org) [6].

Поставленная задача решается путем прямого численного моделирования на основе метода конечного объема с использованием вычислительного пакета OpenFOAM, в основе исходного кода которого лежит набор библиотек, предоставляющих инструменты для решения систем дифференциальных уравнений в частных производных как в пространстве, так и во времени. На сегодняшний день пакет OpenFOAM позволяет решать до-, около- и сверхзвуковые задачи гидродинамики ньютоновских и неньютоновских вязких жидкостей как в несжимаемом, так и сжимаемом приближении с учетом конвективного теплообмена и действием сил гравитации, многофазные и сопряженные задачи с учетом деформации расчетной сетки и описанием химических реакций, а также проводить распараллеливание расчетов, как в кластерных, так и многопроцессорных системах. Открытость исходного кода пакета позволяет создавать собственные решатели с использованием объектно-ориентированного языка программирования C++, что дает возможность реализовывать численные решения для сложных и специфических математических моделей.

Для расчета течений непрерывно стратифицированных жидкостей в рамках пакета OpenFOAM был разработан собственный решатель stratifiedFoam на основе стандартного солвера isoFoam, решающего нестационарные уравнения Навье-Стокса для однородной вязкой несжимаемой жидкости. Новый решатель реализован путем введения дополнительных переменных и соответствующих уравнений для их расчета – переменной плотности, концентрации стратифицирующего компонента и визуализирующей примеси, а также новых параметров – частоты плавучести, масштаба стратификации, коэффициентов диффузии, ускорения свободного падения и других вспомогательных параметров, ответственных за включение эффектов нелинейности, стратификации и диффузии. В уравнение Навье-Стокса для вертикальной компоненты скорости введены дополнительные члены, учитывающие влияние стратифицирующего компонента и визуализирующей примеси, а в уравнение для возмущения солёности – дополнительные слагаемые, определяющие фоновую стратификацию и диффузию растворенных веществ (см. систему (2.1)). На базе основных рассчитываемых переменных – компонент скорости, давления, плотности, солёности были проведены расчеты других не менее важных физических величин – полной плотности, функции тока, динамической завихренности, скорости бароклинной генерации завихренности, компонент тензора вязких напряжений, скорости диссипации механической энергии, распределения различных динамических характеристик, воздействующих на обтекаемое препятствие.

Граничные условия формулировались следующим образом: для скорости на границе препятствия ставилось условие прилипания $U = 0$, для давления – равенство нулю нормального градиента, для солёности – фиксированное значение нормального градиента, зависящего от величины стратификации и направления локальной нормали поверхности относительно вертикали, для визуализирующей примеси задавался источник вещества, равномерно распределенный на определенной части поверхности препятствия. При численной реализации граничных условий были использованы стандартные и расширенные утилиты пакета OpenFOAM, такие как setFields, topoSets (с дополнительным использованием расширенных библиотек swakSourceFields и swakTopoSources), swak4Foam, groovyBC, funkySetFields, funkySetBoundaryField, которые позволяют задавать аналитические выражения для различных физических переменных с использованием программы GNU bison, предназначенной для автоматического создания синтаксических анализаторов по данному описанию грамматики.

В качестве расчетной области был выбран квадрат со стороной, по длине на порядок превышающей характерный размер препятствия, помещенного в центр расчетной области. При расчете течений, индуцированных прерыванием диффузионного потока на непроницаемом препятствии, на внешних границах расчетной области ставились "мягкие" граничные условия типа линейной экстраполяции, соответствующие равенству нулю нормального градиента всех рассчитываемых физических переменных. При рассмотрении задачи обтекания препятствия на входе в расчетную область (левая граница) задавался равномерный поток, на верхней и нижней ее границах формулировалось условие плоскости симметрии, т. е. нулевые значения для вертикальной компоненты, $U_y = 0$, и отсутствие нормального градиента для горизонтальной, $\partial U_x / \partial y = 0$, а на выходе из расчетной области (правая граница) задавались "мягкие" граничные условия.

Построение расчетной сетки осуществлялось как на основе стандартных утилит blockMesh, snappyHexMesh, так и с использованием независимого сеточного генератора Salome. Процедура построения структурированных расчетных сеток с помощью утилиты blockMesh была автоматизирована благодаря применению макропроцессора m4, что позволило существенно сократить время перестраивать сетку при изменении геометрических параметров расчетной области и препятствия – пластины, диска, клина либо цилиндра. С целью адекватного разрешения диффузионных микромасштабов вблизи непроницаемых границ препятствий и областей, в которых выражены тонкоструктурные вихревые компоненты течений, дополнительно использовались стандартные утилиты topoSet и refineMesh, позволяющие на основе геометрических либо параметрических признаков выделять подобласти расчетной сетки и измельчать их в соответствии с заданными масштабами и выбранными направлениями.

Для вычисления объемных интегралов по контрольному объему использовалась общая процедура Гаусса, согласно которой интеграл по объему представляется через интеграл по поверхности ячейки, а значение функции на поверхности ячейки интерполируется из значений функции в центроидах соседних ячеек. Для интерполяции конвективных членов использовалась TVD схема (limitedLinearV), соответствующая обобщенной кусочно-линейной схеме Чакраварти-Ошера. На ортогональных участках сетки нормальные градиенты скорости на поверхности ячейки, необходимые при вычислении диффузионных членов по теореме Гаусса, находились из значений скорости в центроидах соседних ячеек по схеме второго порядка. На неортогональных участках использовалась итерационная процедура коррекции погрешности, вызванной неортогональностью сетки. Для дискретизации производной по времени использовалась неявная трехточечная несимметричная схема второго порядка с разностями назад (backward differencing).

Для связанного расчета поля скорости и давления использовалась предложенная Исса процедура PISO (pressure implicit with splitting of operators) с числом корректоров 4. Для решения полученной системы линейных алгебраических уравнений применялись итерационные солверы PCG и PBiCG, использующие методы сопряженных и бисопряженных градиентов с предобуславливанием для симметричных и асимметричных матриц соответственно. В качестве предобуславливателя были выбраны процедуры DIC (предобуславливатель, основанный на упрощенной схеме неполной факторизации Холецкого) и DILU (предобуславливатель, основанный на упрощенной неполной LU факторизации) для симметричных и асимметричных матриц соответственно.

Расчеты поставленных задач проводились в параллельном режиме с применением методов декомпозиции расчетной области на базе технологической платформы UniHUB с использованием вычислительных ресурсов кластера МСЦ РАН [8]. С целью оценки эффективности распараллеливания были проведены расчеты двумерной задачи формирования течения, индуцированного диффузией на неподвижной наклонной пластине, с общим количеством расчетных ячеек 2.5×10^6 . В процессе тестовых расчетов на кластере было задействовано различное количество вычислительных узлов (вплоть до 10) с использованием всех восьми процессорных ядер на узле. Практически линейную зависимость коэффициента ускорения от числа n , определяемого как количество используемых в расчетах ядер кластерной системы, удалось получить только при $n < 8$. С дальнейшим увеличением задействованных ядер наблюдалось монотонное уменьшение коэффициента ускорения вычислений, которое достигало приблизительно значения 0.8 при задействовании всех 10 вычислительных узлов.

4 Результаты расчетов

В качестве иллюстрации работоспособности разработанного решателя открытого пакета OpenFOAM приводятся результаты расчета течений, индуцированных диффузией на непроницаемых препятствиях, с использованием технологической платформы UniHUB. Такие течения образуются в результате прерывания молекулярного потока стратифицирующего компонента на непроницаемой границе и, как следствие, формирования областей дефицита (избытка) плотности над (под) неподвижным препятствием, погруженным в непрерывно стратифицированную жидкость.

Картина течения, индуцированного диффузией на горизонтальной пластине, состоит из многоуровневой последовательности симметрично расположенных горизонтальных вихревых ячеек (рис. 1, *a*) [3]. Циркуляция в соприкасающихся ячейках над и под пластиной, как и в соседних ячейках на одном горизонте, имеет противоположные знаки, в отличие от ячеек многокомпонентной конвекции, где скорости разнонаправлены и границы ячеек отмечены слоем покоящейся жидкости. Даже малое отклонение пластины от горизонтального положения приводит к нарушению симметрии течения и формированию новых циркуляционных систем, включая восходящее и нисходящее струйные течения вдоль, соответственно, верхней и нижней сторон пластины и систему компенсационных циркуляционных ячеек (рис. 1, *б*). С дальнейшим увеличением угла наклона пластины к горизонту прилегающие к препятствию струйные течения утончаются, а вертикальный размер антициклонических циркуляционных ячеек, примыкающих к главным струям, наоборот, увеличивается, поскольку его величина определяется вертикальным масштабом препятствия ($L_z=L_x \sin\varphi$). Расчеты полных сил и моментов, действующих на наклонную пластину в покоящейся непрерывно стратифицированной жидкости, показывают, что формирующиеся струйные течения жидкости создают момент сил, стремящийся повернуть наклонную пластину в устойчивое горизонтальное положение [4].

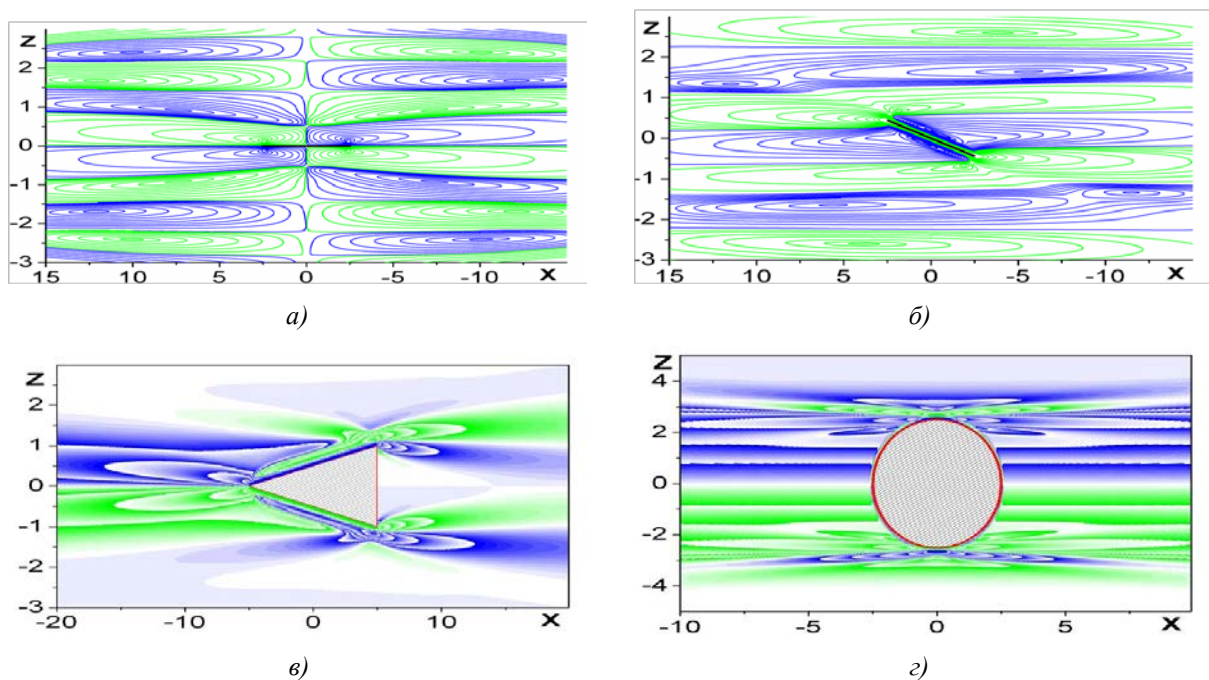


Рис. 1. Картины течений, индуцированных прерыванием диффузионного потока неподвижными: горизонтальной (*a*) и наклонной (*б*), симметричным клином (*в*) и круговым цилиндром (*г*).

Непроницаемое клиновидное препятствие, погруженное в толщу непрерывно стратифицированной жидкости, блокирует фоновый диффузионный перенос стратифицирующей компоненты, в результате чего вблизи его боковых поверхностей формируется тонкий слой дефицита солености на верхней грани и избытка солености на нижней. Это приводит к тому, что жидкость начинает оттекать от поверхности клина в слоях почти однородной толщины, формируя восходящие струйные течения вдоль наклонных граней и систему примыкающих противотечений (рис. 1, *в*). Отрываясь от препятствия у его основания, главные струи формируют сложную систему компенсационных циркуляционных ячеек, интенсивность которых резко убывает с расстоянием от препятствия. Окружающая жидкость подтекает к вершине клина вдоль центральной горизонтальной струи, которая утончается к препятствию [7]. В донной области жидкость заблокирована и чрезвычайно медленно подтекает к клину по всей высоте основания, при этом скорость возрастает только при подходе к вершинам клина. В полях всех переменных выражены элементы структуры, дополняющие препятствие до симметричного тела – от треугольника к призме. В картине поля возмущений давления область дефицита располагается в толстом слое перед телом и в тонкой прослойке, примыкающей к боковым сторонам клина. Разность давлений – подпор у основания и дефицит перед клином, а также в тонком слое вдоль его боковых сторон и создает интегральную силу, толкающую горизонтальный клин в направлении его вершины – пропульсивную силу самодвижения свободного тела нейтральной плавучести. Основным является дефицит давления, достаточный для описания наблюдаемого перемещения тела со скоростью порядка сантиметра в час в условиях лабораторного эксперимента [8].

Картина течения, индуцированного диффузией, около непроницаемого цилиндра качественно отличается от структуры течений около наклонной пластины и горизонтального клина. Это обусловлено зависимостью

величины нормального градиента возмущения солености от значения угла между вертикальной осью и вектором нормали к поверхности препятствия. Толщина формирующихся слоев дефицита и переизбытка солености ниже и выше препятствия оказывается существенно неоднородной вдоль поверхности цилиндра (рис. 1, ε), в отличие от рассмотренных ниже случаев наклонной пластины и клина, где существенные изменения геометрии основных структурных компонент течения наблюдаются лишь в окрестностях острых кромок препятствий. Интенсивность склоновых струйных течений, формирующихся на поверхности цилиндра достигают максимальных значений в сечении, образующем угол 60° с горизонтальной осью в отличие от результатов расчета параметров главных струй на наклонной пластине, которые показывают пропорциональное увеличение их скорости и толщины с уменьшением угла наклона пластины к горизонту [3]. Численное решение описывает структуру основных конвективных ячеек, включающие тонкие струи вдоль поверхности и растекающиеся факелы от области конвергенции течения над верхним и нижним полюсами цилиндра, постепенно возвращающие частицы жидкости на горизонты нейтральной плавучести [9]. Это характерным образом проявлено в картине поля возмущения давления, где преобладают области с отрицательными значениями величины, что обусловлено компенсационным подтеканием окружающей жидкости к поверхности цилиндра, за исключением областей растекания струй вблизи полюсов препятствия.

Рассчитанные поля возмущений градиента плотности $\nabla\rho$ для течений, индуцированных диффузией на горизонтальной и наклонной пластине, горизонтальном диске и цилиндре, в которых проявляются и крупномасштабные компоненты, размер которых задается длиной пластины, и тонкие прослойки с масштабами $\delta_N^v = \sqrt{v/N}$ и $\delta_N^{k_s} = \sqrt{\kappa_s/N}$, на больших временах согласуются с картинками визуализации («цветной теневой метод» с горизонтальной щелью и решеткой) распределения градиента коэффициента преломления около пластины в лабораторном бассейне (плотность и коэффициент преломления водных растворов поваренной соли связаны линейным соотношением) [10, 11].

В рассчитанной и теневой картинах (рис. 2, a , b) выделяются протяженные горизонтальные полосчатые структуры, примыкающие непосредственно к экстремальным точкам препятствия – острым кромкам диска. Длина полосок растет с повышением чувствительности метода регистрации: структура течения около кромок наклонной пластины оказывается более выраженной более отчетливо при использовании цветного теневого метода с горизонтальным положением осветительной щели и визуализирующей решетки [10]. Течения, индцированные диффузией, существуют в стратифицированной среде при произвольной геометрии препятствия и его ориентации в пространстве, и отсутствуют в однородной жидкости.

С началом движения пластины структура стратифицированного течения меняется кардинально: возникают опережающие возмущения, присоединенные внутренние волны и спутный след. Горизонтальные прослойки, существующие в покоящейся стратифицированной среде на неподвижном препятствии, трансформируются в квазистационарные высокоградиентные области, разделяющие разные типы возмущений, в частности, спутный след и внутренние волны. Рассчитанные поля течения, возникающего при движении горизонтальной пластины в толще непрерывно стратифицированной жидкости, сравниваются с картинками теневой визуализации, получаемыми в лабораторных опытах с применением метода “вертикальная щель – вертикальный нож Фуко” (рис.2, $в$, ε). Численное решение содержит все структурные компоненты поля возмущений и достаточно хорошо согласуется с наблюдениями позади пластины [12].

5 Заключение

Проведены высокоразрешающие параллельные расчеты течений непрерывно стратифицированной жидкости в рамках Web-лаборатории механики сплошных сред на базе виртуальной вычислительной платформы UniHUB, предоставляющей прямой доступ к вычислительным ресурсам кластерных систем и предлагающей широкий выбор вычислительных инструментариев для численного моделирования. Использование вычислительных ресурсов кластерных систем позволило значительно сократить время вычислений и детально проанализировать сложную ячеистую структуру течений, индуцированных диффузией на неподвижных непроницаемых препятствиях различной геометрической формы. С увеличением характерных скоростей эти структуры только усложняются и утончаются, трансформируясь в квазистационарные высокоградиентные области, разделяющие разные типы возмущений – волны и вихри. Тестирование результатов расчетов на лабораторных данных показало хорошее согласие рассчитанных и теневых картин течений стратифицированной жидкости около неподвижных и движущихся препятствий. Численные расчеты адекватно отражают основные элементы структуры стратифицированных течений: циркуляционные ячейки, высокоградиентные прослойки, опережающие возмущения и присоединенные внутренние волны.

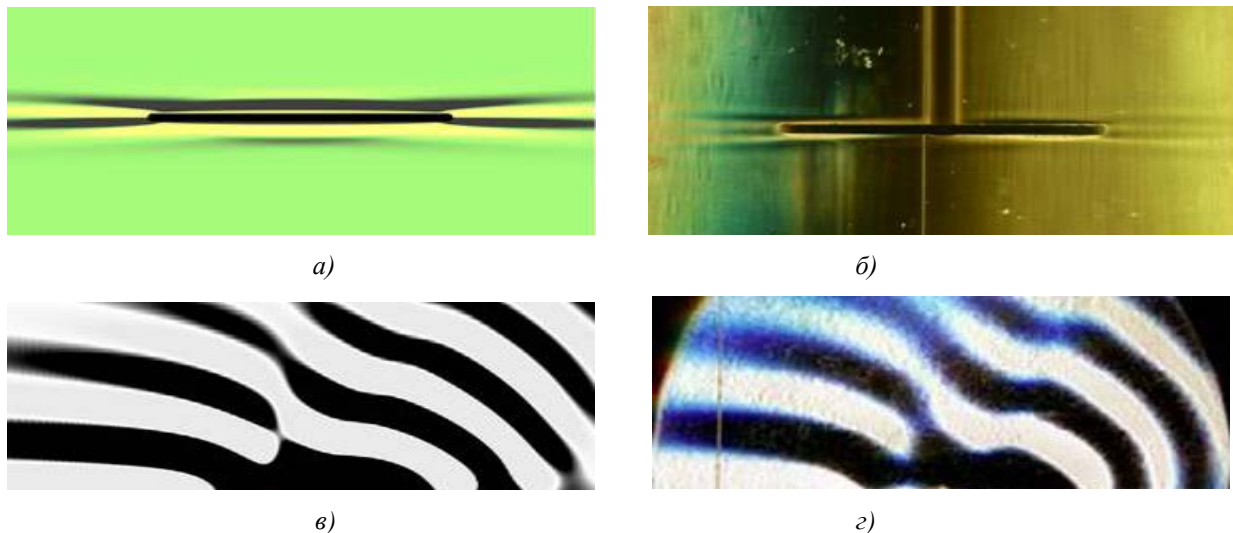


Рис. 2. Сопоставление рассчитанных (а, в) и теневых (б, г) картин течения, индуцированного диффузией на горизонтальном диске, (а, б) и течения, генерированного равномерным движением горизонтальной пластины в толще непрерывно стратифицированной жидкости (в, г).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 13-07-90901, 12-05-90417-укр).

Список литературы

- [1] С. А. Жуматий: Система анализа производительности параллельных программ на кластерных установках. *Вычислительные методы и программирование*, 6: 57-64, 2005.
- [2] В. В. Воеводин и др.: Практика суперкомпьютера "Ломоносов". *Открытые системы*, Москва: Издательский дом "Открытые системы", 2012.
- [3] Ю. Д. Чашечкин, Я. В. Загуменный: Структура течения, индуцированного диффузией на наклонной пластине. *Доклады РАН*, 444(2): 165-171, 2012.
- [4] Я. В. Загуменный, Ю. Д. Чашечкин: Тонкая структура нестационарного течения, индуцированного диффузией на неподвижной пластине. *Известия РАН: Механика жидкости и газа*, 3:100-117, 2013.
- [5] Ю. Д. Чашечкин: Иерархия моделей классической механики неоднородных жидкостей. *Морской гидрофизический журнал*, 5:3-10, 2010.
- [6] Я. В. Загуменный: Использование технологической платформы UniHUB в расчетах тонкой структуры стратифицированных течений на базе открытых пакетов. *III Международная конференция «Облачные вычисления: образование, исследования, разработки», 6-7 декабря 2012, Москва, www.unicluster.ru/events/139-conference-cloud-computing-2012.html*.
- [7] Я. В. Загуменный, Ю. Д. Чашечкин: Индуцированное диффузией течение на клине. *Доклады НАН Украины*, 3:31-39, 2013.
- [8] M. R. Allshouse, M. F. Barad, T. Peacock: Propulsion generated by diffusion-driven flow. *Nature Physics*, 6:516-519, 2010.
- [9] В. Г. Байдулов, П. В. Матюшин, Ю. Д. Чашечкин: Эволюция течения, индуцированного диффузией на сфере, погруженной в непрерывно стратифицированную жидкость. *Известия РАН: Механика жидкости и газа*, 2:130-143, 2007.
- [10] Yu. D. Chashechkin: Schlieren Visualization of a Stratified Flow Around a Cylinder. *Journal of Visualization*, 1(4):345-354, 1999.
- [11] Yu. D. Chashechkin, V. V. Mitkin: A visual study on flow pattern around the strip moving uniformly in a continuously stratified fluid. *Journal of Visualization*, 7(2): 127-134, 2004.
- [12] Ю. Д. Чашечкин, Р. Н. Бардаков, Я. В. Загуменный: Расчет и визуализация тонкой структуры полей двумерных присоединенных внутренних волн. *Морской гидрофизический журнал*, 6: 3-15, 2010.