

Расчет течений непрерывно стратифицированной жидкости с использованием открытых вычислительных пакетов на базе технологической платформы UniHUB

*Загуменный Ярослав Викторович
(Институт гидромеханики НАН Украины, Киев),
e-mail: zagumennyi@gmail.com*

*Юлий Дмитриевич Чашечкин (Институт проблем механики РАН, Москва),
e-mail: yulidch@gmail.com*

Аннотация. В работе представлен авторский опыт использования технологической платформы UniHUB при численном моделировании и проведении расчетов течений непрерывно стратифицированной жидкости с применением свободных прикладных вычислительных пакетов OpenFOAM, Salome и ParaView. Внимание уделяется вопросам построения высокоразрешающих расчетных сеток, постановки сложных граничных с помощью встроенных и расширенных утилит пакета OpenFOAM, разработки собственных решателей, обработки и визуализации расчетных данных, а также проведения расчетов в параллельном режиме на вычислительном кластере МСЦ РАН. Демонстрируются некоторые результаты численных расчетов – картины стратифицированных течений около непроницаемых наклонной и горизонтальной пластин, симметричного клина, горизонтального диска и кругового цилиндра. Приводятся сравнения данных аналитического, численного и лабораторного моделирования стратифицированных течений около различных препятствий, оговариваются условия согласия и расхождения результатов, обсуждаются проблемы переноса данных моделирования на природные системы.

Ключевые слова: численное моделирование; открытые вычислительные пакеты; стратифицированные течения; тонкая структура; внутренние волны; теневая визуализация

1. Введение

Данная работа посвящена одному из наиболее активно развиваемых направлений – построению и численной реализации адекватных моделей природных процессов, протекающих в атмосфере, гидросфере, геосфере Земли, и, в частности, исследованию волн и вихрей – одному из

традиционных разделов классической механики жидкости, сохраняющему свою актуальность на протяжении последних столетий.

Интерес к теме поддерживается логикой развития научных исследований – волновая тематика служит одним из стимулов развития фундаментальной и прикладной математики и объектом интенсивным экспериментальных исследований. Стимулирующими факторами являются и практические потребности – разрушения и катастрофы волновой природы (цунами, наводнения, волны экстремальной высоты) наносят наиболее ощутимый экономический ущерб и сопровождаются человеческими жертвами. Пристальное внимание на сегодняшний день также уделяется решению экологических проблем – развитию технологий мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения. Не теряет своей актуальности и проблема управления аэродинамическим качеством крыловых профилей или иных аэродинамических компоновок ввиду всевозрастающей необходимости экономичного расходования энергоресурсов.

Заметный прогресс в решении перечисленных проблем в последние годы обусловлен развитием компьютерных технологий, которые позволили реализовать более точные методы построения решений и высокоразрешающие численные модели, в которых все большее внимание уделяется изучению влияния эффектов нелинейности, стратификации, вращения, диффузии, теплопроводности, как по отдельности, так и в общей постановке. Учет тонкоструктурных эффектов обычно вносит сравнительно небольшие поправки в локальные значения динамических и кинематических характеристик течений, однако в интегральных масштабах могут давать существенные корректировки в результаты расчетов, проведенных на основе более грубых приближений.

Как правило, жидкости и газы в природных системах неоднородны по составу и концентрации растворенных веществ и взвешенных частиц, температуре, давлению, и, как следствие, плотности. Действие массовых сил (гравитационных, центробежных, электрических) ведет к перераспределению веществ и формированию стратификации – увеличению плотности среды в выделенном направлении. Устойчивая стратификация обеспечивает существование тонкоструктурных течений, индуцированных диффузией на неровностях рельефа [1–6, 12], внутренних волн [7, 8], высокоградиентных квазистационарных областей, разделяющих различные виды возмущений, в частности, волн и вихрей. И расчет, и измерения всех макро- и микрокомпонент течений представляют сложные задачи, все еще не решенные с практически необходимой степенью точности [4–6, 8].

Адекватное математическое моделирование течений жидких сред накладывает необходимость использования фундаментальной системы уравнений механики неоднородных жидкостей, учитывающей влияние свойств среды и градиентов термодинамических потенциалов на структуру и динамику течений. Анализ свойств линеаризованных фундаментальных уравнений и

результаты прецизионного лабораторного моделирования показывают, что полные решения содержат как регулярные возмущенные компоненты, характеризующие волны или вихри, так и сингулярные, описывающие сопутствующие тонкоструктурные элементы течений, которые в приближении однородной жидкости теряют индивидуальные признаки и становятся тождественными, что ограничивает возможности расчета течений [9].

При проведении расчетов на основе фундаментальной системы уравнений механики неоднородных жидкостей полный учет диссипативных факторов затрудняет разработку и реализацию численных схем и предъявляет высокие требования к быстродействию и объему памяти компьютера, вынуждая программиста в ряде случаев пренебрегать эффектами диффузии или загрублять исходную расчетную сетку, что часто приводит к появлению численных погрешностей в тех областях, где в лабораторных наблюдениях выражены тонкоструктурные вихревые течения [6]. Поэтому для обеспечения достаточной точности и высокого пространственного разрешения численных расчетов необходимо прибегать к использованию высокопроизводительных суперкомпьютерных систем с применением различных технологий распараллеливания алгоритмов. Одной из наиболее удобных, эффективных и перспективных вычислительных платформ, предназначенных для моделирования и проведения расчетов задач механики сплошных сред, является виртуальная вычислительная лаборатория UniHUB, созданная на базе вычислительного кластера МСЦ РАН.

Целью данной работы является развитие методики численного моделирования на основе системы фундаментальных уравнений механики неоднородных жидкостей и выполнение расчетов стратифицированных течений около препятствий выбранной формы в физически достижимом диапазоне параметров задачи с учетом переноса вещества, как стратифицирующего компонента, так и визуализирующей примеси. Достоинство такого подхода – возможность получения результатов в естественных физических переменных без привлечения дополнительных констант или связей, а также возможность одновременного изучения крупных и наиболее тонких структурных компонент в рамках единого описания.

2. Постановка задачи

Рассматривается система уравнений механики несжимаемой линейно стратифицированной жидкости, невозмущенное распределение плотности которой $\rho_0(z)$ задается профилем солёности $S_0(z)$ (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, g – ускорение свободного падения), включающая уравнения состояния $\rho(S(z))$, неразрывности, Навье-Стокса в

приближении Буссинеска, диффузии стратифицирующей компоненты и визуализирующей примеси:

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

Здесь s – возмущение солёности (стратифицирующего компонента), включающее коэффициент солевого сжатия, s_0 – концентрация пассивной 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) имеют вид

$$\mathbf{v}, s|_{r \leq 0} = 0, \quad v_x|_{\Sigma} = v_z|_{\Sigma} = 0, \quad \left[\frac{\partial s}{\partial \mathbf{n}} \right]_{\Sigma} = \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial z}{\partial \mathbf{n}}, \quad \mathbf{v}, s|_{x, z \rightarrow \infty} = 0 \tag{2.2}$$

где $\mathbf{n}$ – внешняя нормаль к поверхности препятствия Σ . На бесконечности все возмущения затухают.

Система (2.1) с начальными и граничными условиями (2.2) характеризуется большим числом собственных масштабов: длины (плаучести 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 плаучести, возникающими вследствие неоднородности молекулярного потока стратифицирующего компонента.

3. Метод решения

Поставленная задача решается путем прямого численного моделирования с использованием свободно распространяемого инструментария

вычислительной гидродинамики OpenFOAM с открытым исходным кодом. На основе стандартного решателя isoFoam, предназначенного для расчета течений вязкой несжимаемой однородной жидкости методом конечного объема, был разработан собственный солвер stratifiedFlow, позволяющий рассчитывать течения непрерывно стратифицированных жидкостей в соответствии с системой дифференциальных уравнений (2.1). 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, управляющих учетом эффектов нелинейности, стратификации и диффузии. В уравнение Навье-Стокса для вертикальной компоненты скорости введен дополнительный член, учитывающий влияние стратифицирующего компонента, а в уравнение для возмущения солёности – дополнительные слагаемые, определяющие фоновую стратификацию и диффузию растворенного вещества (см. систему (2.1)). С учетом введенных модификаций также были внесены необходимые изменения в алгоритм PISO для расчета поля давления и удовлетворения условия несжимаемости. На базе основных рассчитываемых переменных – компонент скорости, давления, плотности, солёности, с использованием встроенных утилит OpenFOAM проводились 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 препятствие.

Построение расчетных сеток 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, который позволил достаточно быстро 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 рассматриваемого класса задач механики неоднородных многокомпонентных жидкостей важным элементом является постановка граничных условий, которые оказываются зависящими как от направления локальной нормали к границе препятствия, так и от значения глобальных

координат элемента поверхности. Для задания неоднородных граничных условий для нормального градиента возмущения солёности на непроницаемой поверхности и источника визуализирующей примеси, размещаемого либо в толще жидкости, либо на границе препятствия, 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.

Расчёты проводились в параллельном режиме с использованием различных методов декомпозиции расчётной области на вычислительном сегменте кластера МСЦ РАН на базе технологической платформы UniHUB [10]. Визуализация результатов выполнялась с использованием графического интерфейса ParaView, а также пакета программ для численного анализа и научной графики Origin, в рамках которого был реализован высокоразрешающий метод построения полихромной карты изолиний.

4. Результаты расчетов

В качестве иллюстрации работоспособности разработанного решателя пакета OpenFOAM в данной работе приводятся результаты расчёта течений, индуцированных диффузией на непроницаемой пластине, симметричном клине, горизонтальном диске и круговом цилиндре. Такие течения формируются в результате прерывания молекулярного потока стратифицирующего компонента на непроницаемой границе и, как следствие, образования дефицита (избытка) плотности над (под) неподвижным препятствием, погруженным в непрерывно стратифицированную жидкость.

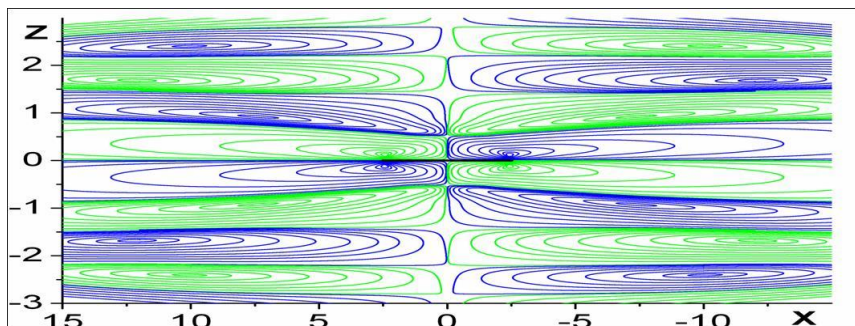
Впервые на возможность формирование течения на неподвижной наклонной поверхности в покоящейся устойчиво стратифицированной воздушной среде указал Л.Прандтль применительно к задаче формирования горных (долинных) ветров [1]. Устойчивый интерес к изучению данного вида течений сформировался после появления работы [2], в которых идеи расчёта были перенесены на стратифицированные жидкости и дополнены лабораторными опытами [12], показавшими наблюдаемость тонкого процесса. В дальнейшем течения, индуцированные диффузией на непроницаемых поверхностях, были прослежены более детально применительно и к атмосфере, где они достигают больших значений на спадающих ледниках, и к гидросфере [3–6]. Такие течения формируют тонкую структуру среды и служат пропульсивными механизмами, обеспечивающими самодвижение тел (например, клиновидного тела нейтральной плавучести в лабораторном бассейне [3]), непроницаемых

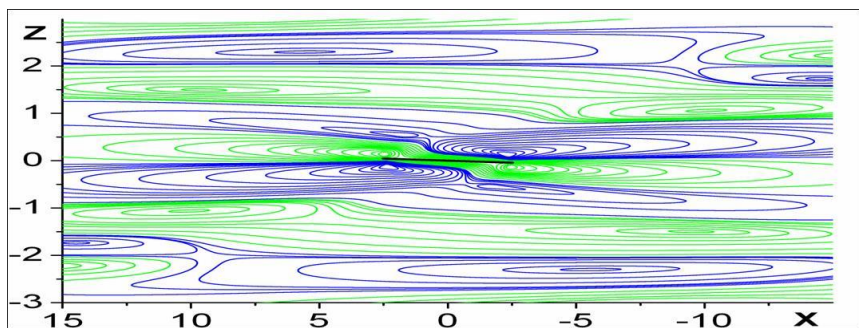
частиц в устойчиво стратифицированной по солености морской среде и в пресноводных водоемах с температурной стратификацией.

4.1. Структура стратифицированного течения на неподвижной пластине

Картина течения, индуцированного диффузией около горизонтальной пластины, моделирующей центральное сечение непроницаемого препятствия произвольной формы, состоит из восьмиуровневой последовательности симметрично расположенных горизонтальных вихревых ячеек (рис. 1, *а*) [5].

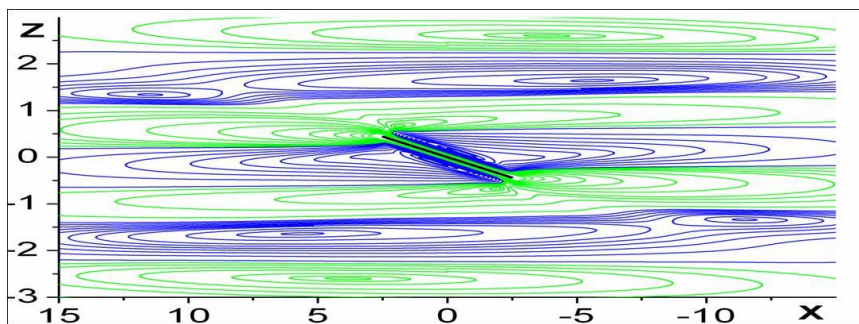
Скорость и завихренность течения резко убывает с удалением от поверхности пластины. Даже малое отклонение пластины от горизонтального положения приводит к нарушению симметрии течения и формированию новых циркуляционных систем, включая восходящее и нисходящее струйные течения вдоль, соответственно, верхней и нижней сторон пластины и систему компенсационных циркуляционных ячеек (рис. 1, *б*). С дальнейшим увеличением угла наклона линии тока непосредственно вблизи пластины располагаются параллельно ее поверхности (рис. 1, *в*). Однородность картины линий тока свидетельствует о неизменности профиля скорости вдоль большей части длины пластины за исключением узких переходных областей в окрестности ее кромок. При дальнейшем увеличении угла наклона пластины к горизонту происходит зарождение новых сложных вихревых систем вблизи внутренних краев циркуляционных ячеек, непосредственно примыкающих к главным струйным течениям (рис. 1, *г*). Внешние контуры примыкающих ячеек имеют периодичную структуру с длиной волны порядка $16\delta_N$, что наиболее отчетливо заметно при больших углах наклона пластины к горизонту, когда вертикальный масштаб препятствия максимален.





а)

б)



в)

г)

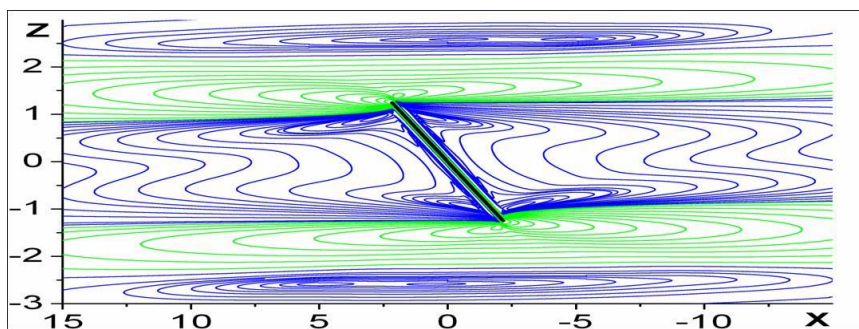


Рис.1. Структура течения, индуцированного диффузией на наклонной пластине:

а) – $\varphi = 0^\circ$, б) – $\varphi = 1^\circ$, в) – $\varphi = 10^\circ$, г) – $\varphi = 30^\circ$, $N = 1.26 \text{ c}^{-1}$, $L = 5 \text{ см}$,
 $\tau = 50$.

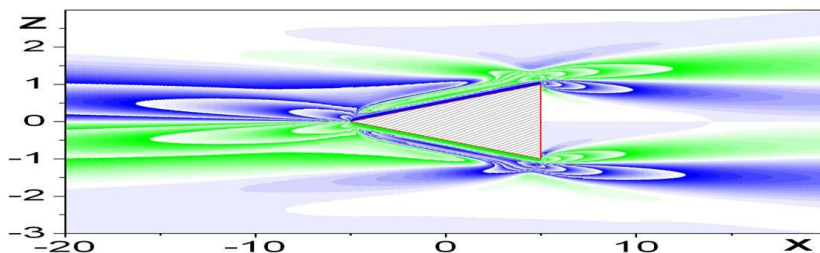
Во всех случаях, и при горизонтальном, и наклонном положении пластины, циркуляция в соприкасающихся ячейках над и под пластиной, как и в соседних ячейках на одном горизонте, имеет противоположные знаки, т.е. скорость на границах соседних ячеек однонаправлена. Такие пространственно-периодические течения можно отнести к классу диссипативно-гравитационных волн, в которых скорость на границах достигает максимального значения, в отличие от ячеек многокомпонентной конвекции, где скорости разнонаправлены и границы ячеек отмечены слоем покоящейся жидкости.

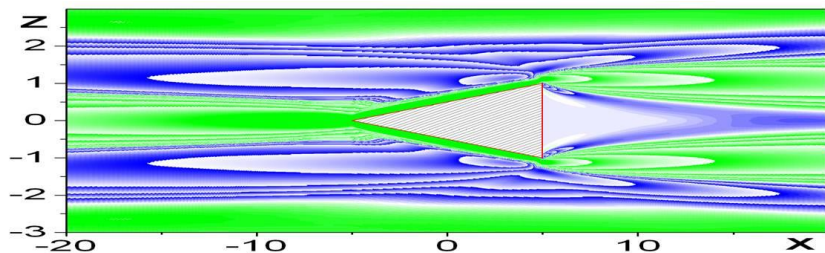
Расчеты полных сил и моментов, действующих на наклонную пластину в покоящейся непрерывно стратифицированной жидкости, показывают, что формирующиеся струйные течения жидкости создают момент сил, стремящийся повернуть наклонную пластину в устойчивое горизонтальное положение [5].

4.2. Индуцированное диффузией течение на клине

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 солёности на верхней грани и избытка солёности на нижней (рис. 2, а). 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. 2, б). 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 [4].

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.





а)

б)

Рис. 2. Картина индуцированного диффузией течения на симметричном клине: поля а) – возмущения солёности, б) – горизонтальной компоненты скорости,

$$L_x = 10 \text{ см}, T_b = 7.5 \text{ с}, N = 0.84 \text{ с}^{-1}, \kappa_S = 1.4 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}.$$

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 [3, 4]. Основным является дефицит давления, достаточный для описания наблюдаемого перемещения тела со скоростью порядка сантиметра в час в условиях лабораторного эксперимента.

4.3. Течение, индуцированное диффузией на горизонтальном цилиндре

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 солёности от значения угла между вертикальной осью и вектором нормали к поверхности препятствия. Толщина формирующихся слоев дефицита и переизбытка солёности ниже и выше препятствия оказывается существенно неоднородной вдоль поверхности цилиндра (рис. 3, а), 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 (рис. 3, б), 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 [5].

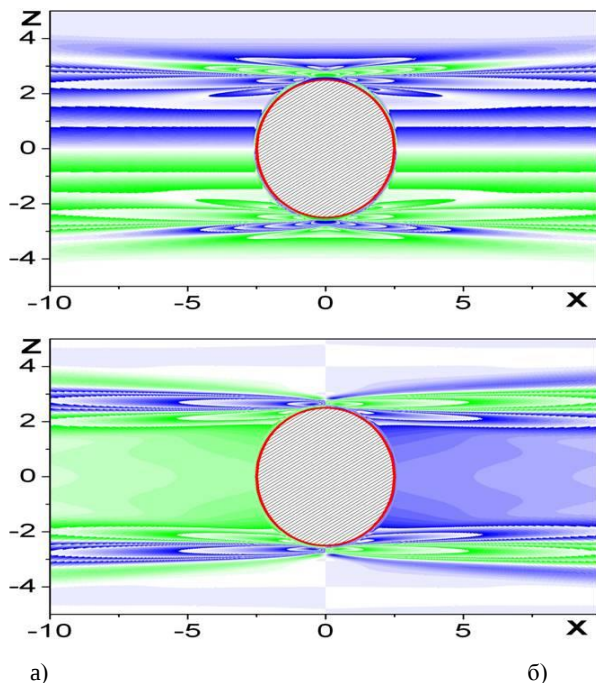


Рис.3. Картина индуцированного диффузией течения на горизонтальном цилиндре: поля а) – возмущения солёности, б) – горизонтальной компоненты скорости,

$$D = 5 \text{ см}, \quad T_b = 7.5 \text{ с}, \quad N = 0.84 \text{ с}^{-1}, \quad \kappa_S = 1.4 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}.$$

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 [6]. 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.

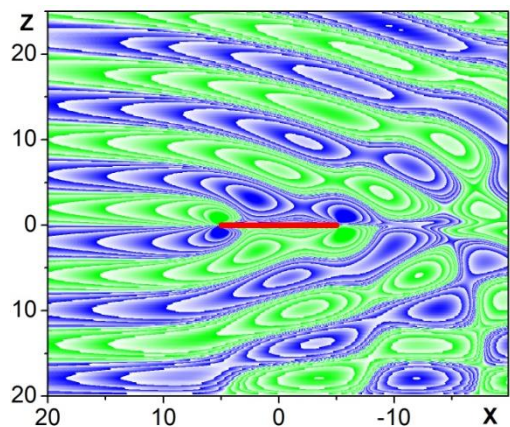
Расчеты динамических характеристик цилиндра показывают, что суммарные силы и моменты, действующие на симметричные части поверхности препятствия, взаимно уравниваются, что подтверждает отсутствие

самопроизвольных движений погруженного в покоящуюся непрерывно стратифицированную жидкость цилиндра нейтральной плавучести.

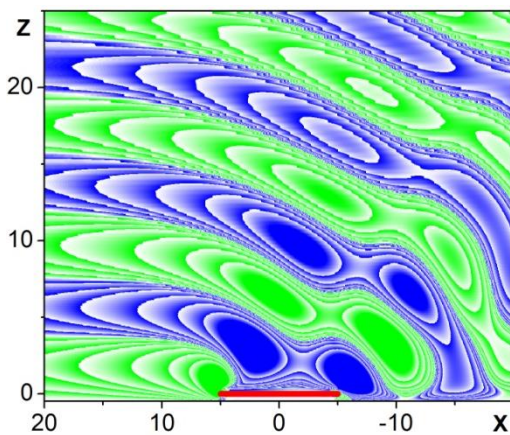
4.4. Экранный эффект для полосы в стратифицированной жидкости

На сегодняшний день проблема управления аэродинамическим качеством крыловых профилей или иных аэродинамических компоновок является насущной ввиду всевозрастающей необходимости экономичного использования энергоресурсов. Одним из решений данной задачи является создание «экранного эффекта», который возникает при движении летательных аппаратов вблизи Земли или поверхности воды. При полете экраноплана на небольшом расстоянии от поверхности возникает дополнительная подъёмная сила, наиболее полный эффект которой проявляется при высоте движения не превосходящей длину хорды крыла. Набегающий поток, отражаясь, успевает дойти до поверхности и вернуться обратно, то есть крыло уплотняет под собой набегающий поток, превращая его в динамическую воздушную подушку [11].

Численное моделирование обтекания горизонтальной пластины конечной толщины – простейшей модели препятствия вблизи подстилающей твердой стенки выполнено на основе фундаментальной системы уравнений механики неоднородных жидкостей с применением построенного решателя пакета OpenFOAM. Рассчитанная картина стратифицированного течения оказывается существенно асимметричной относительно плоскости препятствия даже при его расположении на сравнительно большой высоте от подстилающей поверхности (рис. 4, а). Структура области течения, расположенной ниже плоскости полосы, существенно зависит от соотношения величин $h/\lambda = h/UT_b$ – высоты расположения препятствия и длины внутренней присоединенной волны. Отраженные от жесткой подстилающей поверхности внутренние волны искажают не только область течения под полосой, но и оказывают заметное влияние на волновую картину в верхней полуплоскости.



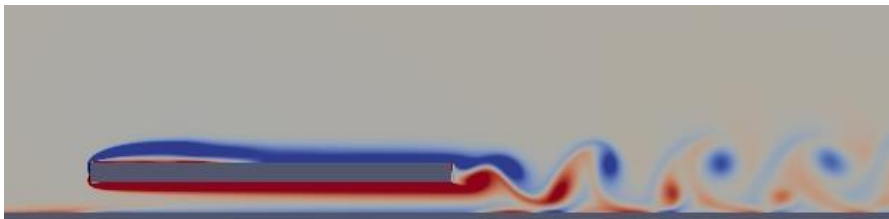
а)



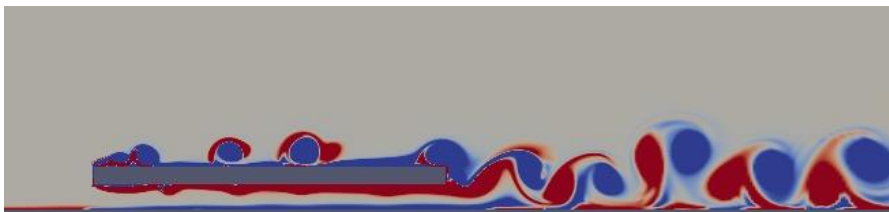
б)

Рис. 4. Картины дальнего поля установившегося течения при обтекании горизонтальной полосы потоком непрерывно стратифицированной жидкости:

$U = 1 \text{ см/с}$, $N = 0.83 \text{ с}^{-1}$, $L = 10 \text{ см}$, $\tau = 20$, а) – $h = 20 \text{ см}$, б) – $h = 0.5 \text{ см}$.



а)



б)

Рис. 5. Картины обтекания горизонтальной полосы потоком стратифицированной жидкости:

а) – $U = 4$ см/с, б) – $U = 24$ см/с, $N = 0.83$ с⁻¹, $L = 10$ см, $h = 1$ см, $\tau = 20$.

В предельном случае малого расстояния между пластиной и донной поверхностью (рис. 4, б) рассчитанные картины течения согласуются с результатами численной визуализации точного решения задачи генерации внутренних волн полосой, движущейся на подстилающей плоскости [8]. Сопоставления рассчитанных картин обтекания горизонтальной полосы потоком стратифицированной жидкости с результатами теневой визуализации в лабораторном бассейне демонстрируют их достаточно хорошую согласованность при малых и умеренных скоростях движения.

С увеличением скорости набегающего потока за обтекаемой пластиной начинает формироваться спутный след, структура которого существенно зависит от расстояния до подстилающей плоскости (рис. 5, а). Наличие ограничивающей поверхности нарушает регулярность следа вниз по потоку, наблюдаемую в случае обтекания пластины в свободном пространстве. Дальнейший рост скорости характеризуется интенсификацией вихревого следа и появлением дополнительных вихревых структур, генерируемых передними острыми кромками пластины с частотой пропорциональной скорости обтекания пластины (рис. 5, б). Формирование вихревых структур вдоль нижней стороны пластины подавляется подстилающей поверхностью, что оказывает стабилизирующее влияние на течение в целом и характер распределения динамических характеристик вдоль сторон препятствия.

5. Тестирование результатов расчета на лабораторных данных

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 $\delta_N^v = \sqrt{\nu/N}$ и $\delta_N^{ks} = \sqrt{\kappa_S/N}$, на больших временах согласуются с картинами 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) [12].

В рассчитанной и теневой картинах (рис. 6) выделяются протяженные горизонтальные полосчатые структуры, примыкающие непосредственно к экстремальным точкам препятствий, разнесенным по вертикали, – острым краям диска и полюсам цилиндра. Длина полосок растет с повышением чувствительности метода регистрации: структура течения около кромок наклонной пластины выражена более отчетливо при использовании цветного теневого метода с горизонтальным положением осветительной щели и визуализирующей решетки. Течения, индиффундированные диффузией, существуют в стратифицированной среде при произвольной геометрии препятствия и его ориентации в пространстве, и отсутствуют в однородной жидкости.

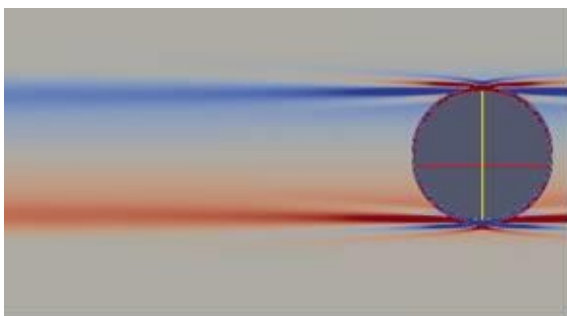
С началом движения пластины структура стратифицированного течения меняется кардинально: возникают опережающие возмущения, присоединенные внутренние волны и спутный след. Горизонтальные прослойки, существующие в покоящейся стратифицированной среде на неподвижном препятствии, трансформируются в квазистационарные 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 картинами теневого визуализации, получаемыми в лабораторных опытах с применением метода “вертикальная щель – вертикальный нож Фуко” (Рис.7). Численное решение содержит все структурные компоненты поля возмущений и достаточно хорошо согласуется с наблюдениями позади пластины [8].



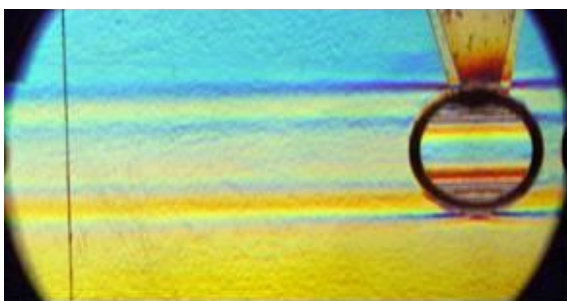
а)



б)



в)



г)

Рис. 6. Рассчитанные (а,в) и теневые (б,г) картины стратифицированных течений около непроницаемых препятствий: а,б) – горизонтального диска и в,г) – кругового цилиндра.



a)

б)

Рис. 7. Рассчитанные поля вертикальной компоненты скорости (верхняя половина изображений) над теневой картиной течения, возникающего при равномерном движении горизонтальной пластины в непрерывно стратифицированной жидкости:
a) – $U=0.1$ см/с, $T_b=7.6$ с, $L_x=7.5$ см ; *б)* – $U=0.32$ см/с, $T_b=7.6$ с,
 $L_x=7.5$ см.

5. Заключение

Разработан собственный решатель открытого пакета OpenFOAM, позволяющий рассчитывать поля всех физических величин стратифицированных течений на основе фундаментальной системы уравнений механики неоднородных жидкостей. Расчеты практически ценных задач проведены на базе технологической платформы UniHUB, предоставляющей все необходимые инструментарии для численного моделирования с прямым доступом на вычислительный сегмент кластера МСЦ РАН.

Проведенные расчеты позволили выявить сложную ячеистую структуру даже в самых медленных течениях, индуцированных диффузией на непроницаемых препятствиях различной геометрической формы. Эти структуры только усложняются и утончаются с увеличением характерных скоростей, трансформируясь в квазистационарные высокоградиентные области, разделяющие разные типы возмущений.

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: высокоградиентные прослойки, опережающие возмущения, внутренние присоединенные волны и спутный след.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность разработчикам вычислительной платформы UniHUB и Web-лаборатории UniCFD за предоставленную возможность удобно и продуктивно работать в виртуальной вычислительной среде, а также академику РАН В.П. Иванникову за ценные советы по совершенствованию методик высокопроизводительных вычислений и профессору Ю.Д. Чашечкину за многолетнюю поддержку усилий по разработке высокоразрешающих численных моделей течений неоднородных жидкостей.

Список литературы

- [1]. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. М.: ИЛ. 1949. 520 с.
- [2]. Phillips O.M. On flows induced by diffusion in a stably stratified fluid // Deep-Sea Res. 1970. V. 17. P. 435–443.
- [3]. Allshouse M.R., Barad M.F., Peacock T. Propulsion generated by diffusion-driven flow // Nature Physics. 2010. V.6. P. 516–519.
- [4]. Загуменный Я.В., Чашечкин Ю.Д. Индуцированное диффузией течение на клине // Доклады НАН Украины. 2013. № 3. С. 31–39.
- [5]. Чашечкин Ю.Д., Загуменный Я.В. Структура течения, индуцированного диффузией на наклонной пластине // Доклады РАН. 2012. Т. 444, № 2. С. 165–171.

- [6]. Байдулов В.Г., Матюшин П.В., Чашечкин Ю.Д. Эволюция течения, индуцированного диффузией на сфере, погруженной в непрерывно стратифицированную жидкость // *Механика жидкости и газа*. 2007. №2. С. 130–143.
- [7]. Chashechkin Yu.D., Mitkin V.V. A visual study on flow pattern around the strip moving uniformly in a continuously stratified fluid // *J. Visualization*. 2004. V.7, №2. P.127–134.
- [8]. Чашечкин Ю.Д., Бардаков Р.Н., Загуменный Я.В. Расчет и визуализация тонкой структуры полей двумерных присоединенных внутренних волн // *Морской гидрофизический журнал*. 2010. № 6. С. 3–15.
- [9]. Чашечкин Ю.Д. Иерархия моделей классической механики неоднородных жидкостей // *Морской гидрофизический журнал*. 2010. №5. С.3–10.
- [10]. Загуменный Я.В. 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, <http://www/unicluster.ru/events/139-conference-cloud-computing-2012.html>.
- [11]. Zagumennyi Ia.V., Bardakov R.N. Ground effect in hydrodynamics of a strip in a stratified fluid // *IUTAM Symposium 12–3 = GA.10-08 “Waves in fluids: effects of non-linearity, rotation, stratification and dissipation”*, June 18-22, 2012, Moscow, Russia, P. 172–175.
- [12]. Chashechkin Yu.D. Schlieren Visualization of a Stratified Flow around a Cylinder // *J. Visualization*. 1999. V. 1, N 4. P. 345–354.

Calculations of continuously stratified fluid flows using open source computational packages based on the technological platform UniHUB

Ia.V. Zagumennyi, Yu.D. Chashechkin

e-mails: zagumennyi@gmail.com, chakin@ipmnet.ru

Institute of Hydromechanics, National Academy of Sciences of Ukraine,

IHM NASU, 8/4, Zheliabova street, 03680, Kiev, Ukraine

Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,

IPMech RAS, 101/1, prospect Vernadskogo, 119526, Moscow, Russia

Abstract. The paper presents the authors' experience in usage of the technological platform UniHUB for numerical simulation and computations of continuously stratified fluid flows based on the open source computational packages OpenFOAM, Salome and ParaView. Special attention is paid to the problems of high-resolution computational grids construction, complex boundary conditions setting using the standard and extended OpenFOAM utilities, own solvers development, numerical data processing and visualization and running program codes in parallel on the JSCC RAS Cluster, as well. Some physical results are demonstrated on the stratified flows structure and dynamics around impermeable sloping plate, symmetrical wedge, horizontal disc and circular cylinder. The obtained numerical results have direct application to the natural systems since the Earth's atmosphere and hydrosphere are mostly stably stratified due to non-uniformity of distributions in space and time of dissolved or suspended matters, gas bubbles, temperature, medium compressibility and effects of external forces. The numerical study of diffusion-induced flows on an impermeable obstacle reveals a system of jet-like flows formed along its sloping boundaries and a complicated structure of circulation cells attached to the surface of the obstacle. The most intensive structures are clearly registered experimentally by Schlieren techniques in form of horizontally extended high gradient interfaces attached to extreme points of an obstacle, i.e. sharp edges of a plate, poles of a cylinder, vertices of a wedge, etc. With increase of typical velocities these structures do not disappear but are transformed into a complicated system of thin interfaces separating different kinds of disturbances, e.g. internal waves and a vortex sheet. The structural elements of extremely slow flows of non-homogeneous fluids form a flow fine structure in rapidly changing environments. The analytical, numerical and laboratory data are compared with each other, conditions of their agreement being discussed together with possibility of their application to the natural systems.

Keywords: direct numerical simulation; open source computational packages; stratified flows; flow fine structure; internal waves; Schlieren visualization.

References

- [1]. Prandtl L. The Essentials of Fluid Dynamics. London: Blackie and Son, 1952.
- [2]. Phillips O.M. On Flows Induced by Diffusion in a Stably Stratified Fluid. Deep-Sea Research, 1970, vol. 17, pp. 435–443.

- [3]. Allshouse M.R., Barad M.F., Peacock T. Propulsion Generated by Diffusion-Driven Flow. *Nature Physics*, 2010, vol. 6, pp. 516–519.
- [4]. Zagumennyi Ia.V., Chashechkin Yu.D. Indutsirovannoe diffuziye techenie na kline [Diffusion Induced Flow on a Wedge]. *Doklady NAN Ukrainy [Reports NAS of Ukraine]*, 2013, no. 3, pp. 31–39 (in Russian).
- [5]. Chashechkin Yu.D., Zagumennyi Ya.V. Structure of Diffusion-Induced Flow on an Inclined Plate. *Doklady Physics*, 2012, vol. 57, no. 5, pp. 210–216.
- [6]. Baydulov V.G., Matyushin P.V., Chashechkin Yu.D. Structure of a Diffusion-Induced Flow Near a Sphere in a Continuously Stratified Fluid. *Doklady Physics*, 2005, vol. 50, no. 4, pp. 195–199.
- [7]. Chashechkin Yu.D., Mitkin V.V. A Visual Study on Flow Pattern around the Strip Moving Uniformly in a Continuously Stratified Fluid. *J. Visualization*, 2004, vol. 7, no. 2, pp. 127–134.
- [8]. Chashechkin Yu.D., Bardakov R.N., Zagumennyi Ia.V. Numerical Analysis and Visualization of Fine Structures of the Fields of Two-Dimensional Internal Waves. *Physical Oceanography*, 2011, vol. 20, no. 6, pp. 397–409.
- [9]. Chashechkin Yu.D. Hierarchy of the Models of Classical Mechanics of Inhomogeneous Fluids. *Physical Oceanography*, 2011, vol. 20, no. 5, pp. 317–324.
- [10]. Zagumennyi Ia.V. Ispol'zovanie tekhnologicheskoi platformy UniHUB v raschyetakh tonkoi struktury stratifitsirovannykh techeniy na baze otkrytykh paketov [Usage of the Technological Platform UniHUB in Calculations of Continuously Stratified Fluid Flows Based on the Open Source Computational Packages]. *Trudy III Mezhdunarodnoi Konferenzii "Oblachnye vychisleniya: obrazovanie, issledovaniya, razrabotki"* [Proc. 3d International Conference on Cloud Computing: Education, Research, Development], 2012. p. 10 (in Russian). <http://www.unicluster.ru/events/139-conference-cloud-computing-2012.html>
- [11]. Zagumennyi Ia.V., Bardakov R.N. Ground Effect in Hydrodynamics of a Strip in a Stratified Fluid. *Proc. IUTAM Symposium 12–3 = GA.10-08 on Waves in Fluids: Effects of Non-linearity, Rotation, Stratification and Dissipation*, 2012. pp. 172–175.
- [12]. Chashechkin Yu.D. Schlieren Visualization of a Stratified Flow around a Cylinder. *J. Visualization*, 1999, vol. 1, no. 4, pp. 345–354.

